الكلية الفنية العسكرية العراقية

منظومات القدرة الكهربائية

Electrical Power Systems

الجزء الأول

ترجمة الدكتور المهندس محمد توفيق لازم الزهيري

الدكتور المهندس فائق جواد محمد العزاوي



الكلية الفنية العسكرية

منظومات القدرة الكهربائية

الجزء الاول

الدكتور المهندس محمد توفيق لازم الزهيري

ترجمة

الدكتور المهندس . فائق جواد محمد العزاوي



الكلية الفنية العسكرية

منظومات القدرة الكهربائية

ELECTRICAL POWER SYSTEMS

BY:

تأليف

A. E. Guile

اي . اي . غايلي

W. Paterson

دبليو . باترسون

ترجمة

الدكتور المهندس
محمد توفيق لازم الزهيري

الدكتور المهندس
فائق جواد محمد العزاوي

الجزء الاول

م/١ القدرة الكهربائية ج١

المحتويات

شكـــــر

تشكـر الـكليـــة الفنيـــة العسكريـــة استـــاذ الهندســـة الـكهربائيـــة الدكتـــور محمد زكي محمد خضر / رئيس مهندسي المنشأة العامة لصناعة السمنت في نينوى لتفضله بتقويم الـكتاب علمياً .

والدكتور حسام سعيد النعيمي – الاستاذ المساعد في كلية الاداب / قسم اللغة العربية / جامعة بغداد لتفضله بتقويم الـكتاب لغوياً .

بسم الله الرحمن الرحيم

– مقدمة المترجمين –

الحمد لله الذي وهب للانسان نعمة العقل ، وخصه على سائر مخلوقاته بالعلم والعمل ، وفضل اهل العلم ورفع درجاتهم (قل هل يستوي الذين يعلمون والذين لايعلمون انما يتذكر أولو الالباب) سورة الزمر / آية 9 ، وأنار بصائر عباده فعاشوا في فيوض المعرفة ، وعرفوا أن الحكمة ضالة المؤمن أين وجدها فهو أحق الناس بها . وبعد ، فان المكتبة العربية ماتزال فقيرة في كثير من العلوم الحديثة ، ولاسيما ماتضمنه هذا الكتاب المترجم من مادة ضخمه ومهمة تخص العاملين في مجال هندسة القدرة الكهربائية من طلبة جامعيين ومهندسين .

ان استمرارية تجهيز القدرة الكهربائية واستقرارها يعد ان علامة من علامات تقدم الامة ولايتحقق ذلك الا بالدراسات العميقة للمنظومات الكهربائية في حلقاتها الثلاث التوليد والنقل والتوزيع ، لذا ينبغي ان يكون لكل من القائمين بالعمل في مجال القدرة الكهربائية وصناعاتها المام كاف بالمبادىء العامة لها وفهم عميق لميادين تخصصهم في الناحيتين العملية والنظرية .

لقد تبلورت فكرة ترجمة هذا الكتاب من قبل المترجمين بعد اقتناعهم بانه يشمل موضوعات هندسة القدرة الكهربائية جميعها ويعني بها بما في ذلك التطورات الحديثة التي دخلت هذا المضمار اذ أنه ملائم لتدريس موضوعات هذا التخصص للمرحلة الجامعية كما انه يفي بجزء من متطلبات الدراسات العليا في الجامعات . وانه لاغنى لاي مهندس عامل في مجال القدرة الكهربائية عنه . ولقد روعي في الترجمة الالتزام الكامل بالنص الاصلي قدر الامكان وبذل الجهد في افهام القارىء نصوصه وادراك مقوماته ودقائقه بصورة سلسة . ولم يكن في الميدان من الكتب العربية مايمكن ان يتقدم على هذا الكتاب بحيث يغني عن النهوض بهذا العبء الجسيم .

وسيجد القارىء فيه مادة علمية غزيرة . ومناهج حديثة . ونتائج جديدة وارتباطاً بين مواد فصوله وتآلفا في سياق محتوياته . ولقد كان العثور على الطريقة التي ننقل فيها للقارىء مايقرب الموضوعات المعقدة والمتقدمة بلغة الضاد امراً شاقــــاً جــــداً .

بين يديك الان ثمرة جهد لانزكيه ولكنا نجد الغبن في الا ننبه عليه ونسميه ، جعلنا الله سبحانه وتعالى من الذين يستمعون القول فيتبعون أحسنه ، والله من وراء القصد .

المترجمان

مقدمة الطبعة الأولى

ان هذا الكتاب هو الكتاب الأول لجزأين كتب ملائمة لحاجة الطلبة الذين يدرسون منظومات القدرة الكهربائية في الجامعات والكليات والمعاهد الفنية . ولوجود تغير كبير في محتويات مفردات المناهج الدراسية لهذا الموضوع في المعاهد المختلفة يمكن القول ان الجزء الأول من الكتاب هذا يعد دليلاً عاماً يتناول الموضوع بمستوى السنة الثانية لدراسة شرف جامعية لها بعض التخصصات في هندسة القدرة الكهربائية . وفي الوقت نفسه فان التعمق والمعالجة لموضوعات مختارة وضعت بحيث تلائم الشهادات العلمية الاعتيادية مثل C.E.I. القسم الثاني وشهادة الـ H.N.D أو الـ H.N.C .

فالنص مثلا مصمم ، على الرغم من استخدام المصفوفات بالاماكن الملائمة ، ليكون مفهوماً من قبل الطلبة الذين ليست لديهم معرفة سابقة كافية عنها . أما الجزء الثاني فسوف يتعمق في الموضوع الى مستوى السنة المنتهية لنيل درجة الشرف . وقد تم تقسيم المواد بين الجزأين بعناية تامة من قبل المؤلفين . وبقدر المستطاع فان موضوعاً ما قد تم عرضه ليكون بمستوى درجة الشرف في هذا الجزء بحيث لم تعد الحاجة قائمة للتطرق اليه بتفاصيل أكثر في الجزء الثاني . فمثلا الاعطال غير المتوازنة وضعت لتشمل بعض المواد التي يتم التعامل معها اعتيادياً في السنة المنتهية لتدريسات درجة الشرف . أما موضوع الحماية فان المواضيع الأولية تم التطرق اليها في الجزء الأول فقط ، بينما يغطي الجزء الثاني مواضيع متقدمة أكثر اضافة للموضوع المتضمن قطع الدائرة .

وقد زود كل فصل من هذا الكتاب بمقدمة تعطي تعاريف واظهاراً للنظرية الاساسية . وقد اعطيت أمثلة محلولة وذلك عند الشعور بانها تضيف وتوضح النص باسلوب مفيد حقيقة ، ولم تعط هذه الأمثلة في الحالات التي تتضمن تعويضاً في المعادلات فقط . وفي نهاية كل فصل اعطيت مسائل مختلفة مع اجوبتها ، وتوجد في نهاية الكتاب ايضاً مسائل اضافية . والسبب في اعطاء المسائل الاضافية هذه قد يكون ناتجاً عن الشعور بان الطالب يميل الى الرغبة في التفكير وتطبيق المعرفة ضمن النطاق الاصطناعي لمؤسسته التعليمية ، ويحتاج الى الممارسة العملية لاستكمال المعلومات من أوجه الموضوع المختلفة .

ومن المؤمل ان المدرسين المحاضرين سوف يجدون في هذا الكتاب فائدة تكمن في تزويدهم بمواد يمكن ان يطلب من الطلاب دراستها لانفسهم . وعليه سوف يكون للمدرسين وقت أكثر للتوسع في تغطية هذا الكتاب التدريسي ليلائم مفردات المنهج الخاصة بهم وكذلك ليشمل تخصيص ساعات دراسية لحل المسائل العديدة وتطويراً أكثر للنقاط المقترحة للطلبة . ان الطلبة جميعهم غالباً ما يقضون جل فترة المحاضرات بنقلها بصورة سريعة ، أما الفرصة المتاحة لهم للتفكير والفهم والمناقشة والممارسة مشاهدة عملية للمعلومات الفنية فهي قليلة .

ان المؤلفين يرحبان باي انتقاد بناء لهذا الكتاب الدراسي وسوف يكونان ممتنين اذا اخبرا باي خطأ أو تعقيب .

ويتقدم المؤلفان بشكرهما الى الدكتور سي . اج . غوزلنك وكذلك الى السادة دي ، جي . بل ودبليو . باومن و أف . ار.هيك الذين قاموا بقراءة فصول خاصة ، وكذلك يتقدمون بشكرهم الى شركة جون وايلي وأولاده لاعطائهم فرصة اعادة طبع المخططات 1 , 2 , 3 من كتاب « مبادىء نقل القدرة الكهربائية » لمؤلفه أل . اف . وودرف ، وشركة الكهرباء الانكليزية المحدودة للسماح باعادة اظهار الشكل 9.5 . ويشكر المؤلفان أيضاً جامعة لندن وجامعة ليدز وكلية ليدز التكنولوجية ومعهد المهندسين الكهربائيين للسماح باقتباس أسئلة من الأوراق الامتحانية السابقة ، على ان الأجوبة من مسؤولية المؤلفين .

ان الأسئلة التي أخذت من أوراق امتحان الدبلوما لكلية ليدز التكنولوجية يرمز اليها بـ L.C.T ، أما تلك المأخوذة من اوراق امتحانات الشهادة العليا الوطنية أو الدبلوما فيرمز لهما بـ H.N.C أو H.N.D . وتلك التي أخذت من امتحانات القسم الثالث لمعهد المهندسين الكهربائيين يرمز لها بـ I.E.E . ومما يجب ملاحظته هو أنه قد تم حذف المقاطع الوصفية والنظرية لهذه الأسئلة اقتصاداً في الصفحات ، بحيث ان بعضاً منها لم يعد بشكله الاصلي التام .

مقدمة الطبعة الثانية

ان هذه الطبعة قد تم تنقيحها باستخدام الوحدات القياسية العالمية SI بصورة شاملة . وقد سنحت الفرصة لشمول الاشارة الى بعض التطويرات الحديثة ، ومثال على ذلك نمو تقنيات المولدات المنوبة والنمو المطرد المحتمل في المستقبل لها . وكذلك الوضع الحالي لقابلوات الفولتية العاليـة ذات التقنيات الكبيرة .

الفصل الأول

النقـــل TRANSMISSION

1.1 مقدمـــة

يتضمن هذا الفصل مناقشة نظرية خطوط نقل القدرة التي تعمل تحت ظروف الحالة المستقرة . في البداية سيتم التطرق الى تعديد الخواص العامة لمنظومة نقل معينة كما رتبت في المملـكة المتحدة . ان جميع المعلومات والتعليقات على الامثلة النموذجية في هذا الفصل (او بصورة عامة خلال الـكتاب نفسه) وكذلك الممارسات الجارية تكون منسوبة الى منظومة قدرة تعمل بتردد مقداره 50 هرتز .

تقوم خطوط النقل بنقل القدرة الـكهربائية من محطة ارسال (S) الى محطة استلام (R) بصورة مباشرة . حيث لايتم تجهيز اي من المستهلـكين لهذه القدرة ضمن مسـار الخطوط . وعلى العكس . فان خط توزيع او الموزع يجهز المستهلـكين مباشرة وعلى مسافات قصيرة على طول الخط . لذلك فان موزع القدرة هذا يخضع للمتطلبات القانونية وهي ان القدرة يجب ان تجهز بفولتية تتغير ضمن $\pm 6\%$ من الفولتية المنصوص عليها (خدمة او مقننة) في حين ان خط النقل لايخضع لهذه التحديدات او الضوابط حيث يمكن ان تتغير فولتيته بنسبة قد تصل الى 10 او حتى 15% بسبب التغيرات الحادثة في الحمـل . وعليه فان اي تحديد على فولتية النقل يعد فنيا وليس قانونيا . ومن الناحية العملية التفريق بين النقل والتوزيع ليس واضحا بصورة مقطوعة حيث ان العديد من المستهلـكين الـكبار يجهزون في الوقت الحاضر بفولتية 132 ك . ف فما فوق . وهناك ايضا احمال احادية الطور تكون مأخوذة من طورين اثنين لخط ذي فولتية 132 ك . ف . ويشار الى منظومة القدرة مجتمعة « بالشبكة الـكبرى اما المنظومات ذات 275 ك . ف 400 ك . ف فتسمى بـ « الشبكة الفائقة » .

على الرغم من ان شبكة 400-420 كيلوفولت الحالية والتي يصل طولها الى حوالي 7000 كيلومتر طول من المتوقع ان تلبي الاحتياجات والمتطلبات الاساسية في المملكة المتحدة الى نهاية القرن الحالي ، مع ذلك فان البحوث جارية على فولتيات اعلى . على سبيل المثال يجري البحث الآن على برج ناقل لفولتية مقدارها 1300 ك . ف .

قد ينتهي طرفا خط ناقل عند محطات توليد اوعند محطات أقلدة شبكة كبرى (Grid-switching stations) اوعند نقاط تجهيزها . وفي محطات التوليد الحديثة عادة ماتكون قضبان توزيعها (أطرافها) في الوقت الحاضر من النوع الذي يثبت في العراء (خارجي) اما محطات أقلدة الشبكة الكبرى فتحتوي على قضبان توزيع خاصة مشابهة لتلك التي في محطات التوليد ، ويمكنها لاتكون ضمن محطة توليد خاصة معينة . تحتوي محطات الأقلدة هذه على محولات يكون الغرض منها امكانية ربط فولتيات الشبكة المختلفة المستويات في الجهد وكذلك تحتوي على قواطع دورة لازالة الاعطال والسيطرة على المنظومة.أما نقطة تجهيز شبكة فهي النقطة على المنظومة التي عندها تجهز الهيئة المركزية لتوليد الكهرباء (العامة) الطاقة الى هيئة كهرباء (لمنطقة محدودة) ، وتحتوي هذه المحطة بصورة عامة على محولات لخفض الفولتية الى 33 ك .ف . وكذلك قواطع دورة للسيطرة على الدوائر الخارجة : من هذه النقطة ومايلحق بها خارجاً فان فولتية المنظومة يجب ان تبقى ضمن الحدود المسموح بها قانوناً .

ان المعالم الاساسية (وتدعى ايضاً بالثوابت) لخط نقل معين هي مقاومة التوالي والتوازي ومحاثة التوالي (الذاتية والمتبادلة) ومتسعة التوازي له . تتكون المحاثة نتيجة المجالات المغناطيسية الناشئة عن مرور تيارات الخطوط وتحمل محاثة التوالي هذه تيار خط (انظر الفصل الثاني) . تنشأ المتسعة مع تيار شحنها عن المجال الكهربائي الحادث بسبب فولتية المنظومة وتظهر دائرة توازعبر فولتية المنظومة ، وهذه الفولتية عادة ماتكون فولتية خط الى محايد أو لكل طور نجمي (انظر الفصل الثالث) .

من النادر ان يكون العازل لخط ما على درجة من الكمال وعليه تسري تيارات متسربة على سطوح العوازل وخاصة خلال الحالات الرديئة للطقس (انظر الفصل الرابع) . يكون تمثيل هذا التسرب بمقاومة توازلها قيمة اومية عالية مربوطة عبر فولتية طور المنظومة (خط الى محايد) وعليه تكون على التوازي مع متسعة المنظومة . ان هذا التسرب يسبب

فقدان قدرة ويكون هذا الفقدان دالة لفولتية المنظومة (وليس لتيار الخط) . تسبب ظاهرة الهالة (Corona) (أنظر الفصل الثالث) فقدان قدرة من المنظومة معتمدة على فولتية المنظومة نفسها وتكون متضامة مع تأثير التسرب . في العادة يتم اهمال تأثيرات الهالة والتسرب (الا اذا اعطيت المعلومات بخصوصها) والسبب يعود الى كون قيمة مقاومة التوازي المؤثرة عموماً اكبر بعدة مرات من المفاعلة السعية . ان التحليلات في هذا الفصل سوف تتم على فرض ان المعالم الاساسية تكون معلومة .

ولتمييز خطوط نقل القدرة عن خطوط الاتصالات يتم تصنيفها الى خطوط قصيرة . وخطوط طويلة . ويعرف الخط القصير بانه ذلك الخط الذي يمكن فيه اهمال تأثيرات دوائر التوازي بصورة كلية . لهذا فان الخط القصير يكون له دائرة (نموذج) مكافئة بسيطة على شكل توال . يستساغ هذا التقريب اعتيادياً للخطوط التي يكون طول مسارها لغاية حوالي 80 كيلو متراً . ولكن المعيار الحقيقي هو الدقة المطلوبة في حل مسألة ما .

يفترض الحل التقريبي لخط طويل (يشار اليه في بعض الاوقات بوصفه خطاً متوسطاً) ان مجمل تأثير التوازي يمكن جعله متضاماً عند نقاط مختارة على طول الخط . ومثال على ذلك يكون تأثير التوازي جميعه في الوسط وينتج عن هذا دائرة T (تي) الاسمية ، أو قد يؤخذ نصفه عند كل نهاية من الخط وينتج عن هذا دائرة Π (باي) الاسمية . وتميل هاتان الدائرتان الى اعطاء بعض الكميات التي تكون على جوانب مخالفة للحقيقة (حل غير دقيق وسريع للخطوط الطويلة المتجانسة) ولكنها عادة تتطلب اجراء حسابات دقيقة لحد اربعة ارقام مابعد الفارزة لغرض بيان اي اختلاف قد يحصل في اجوبتها . تستخدم كلمة الاسمي (nominal) للتأكيد على ان اسلوب الربط يكون مفيداً في حالة كون ان هاتين الدائرتين لهما ممانعة توالٍ كلية ومسامحة توازكلية توافقان ما للخط نفسه وفق الصيغ الرياضية المعطاة في الفصلين الثاني والثالث من هذا الكتاب . يجب ان لاتتضارب الدوائر الاسمية مع دوائر T و Π المكافئة الى حد الارباك حيث ان الاخيرتين تعدان تمثيلاً مضبوطاً لخط طويل طالما اخذت الظروف الطرفية بنظر الاعتبار . تتيسر في الوقت الحاضر حاسبات الكترونية لغرض تنفيذ الحسابات الرياضية المتعبة في هذا المضمار ، وعليه فانه قد يتم استخدام دائرة Π أو أكثر مربوطة على التعاقب لتمثيل الخطوط الطويلة .

ان الافتراض الرئيسي الذي وضع في الحل السريع التقريبي ، لخط طويل هو كون هذا الخط متجانسا ، وعليه فان المعالم الرئيسية يمكن اعطاؤها لكل كيلو متر طول .

اما العلاقات الرياضية التي اشتقت في الفصل الثاني والفصل الثالث فتفرض ان الموصلات تكون مستقيمة في طولها ومتوازية ولها ارتفاع ثابت عن الارض وبسبب التدلي الذي يحصل في الخط فان هذه الافتراضات الظرفية لاتتحقق بصورة قطعية وعليه فهنالك بعض الشكوك في المحنى المضبوط لمســـــار الطـــول .

ان النزعة الحديثة هي التعميم : وهذه تعني تطوير نظرية لها قدرة التطبيق على انواع عديدة من الدوائر وليست مقصورة على حالة خاصة . ونظرية الشبكة ذات الاطراف – الاربعة (أو ذات المنفذين) مع ثوابتها المسماة ABCD ، والتي ستناقش لاحقاً في هذا الفصل ، مهمة في تطبيقها على انواع خطوط النقل جميعها (وغيرها من مفردات المشاريع الكهربائية) .

قد تحتوي منظومات النقل على خطوط علوية معلقة (انظر الفصل الرابـــــع) أو قابلوات ارضية (انظر الفصل الخامس) أو تكون مزيجاً بين الاثنين وذلك لان كثيرا من الخطوط تنتهي في نهايات قابلو . ولتجنب التكرار المتعب . في هذا الفصل سوف يشار الى الخطوط فقط . ولكن النظريات تطبق بالتساوي على القابلوات عندما يتم عمل التغيرات اللازمة والسماحات المستحقة للمعالم الاساسية لهذه القابلوات . وتميل القابلوات الى امتلاكها ممانعة توال واطئة ومتسعة تواز عالية وتكون اطوالها اعتياديا كيلو مترات معدودة .

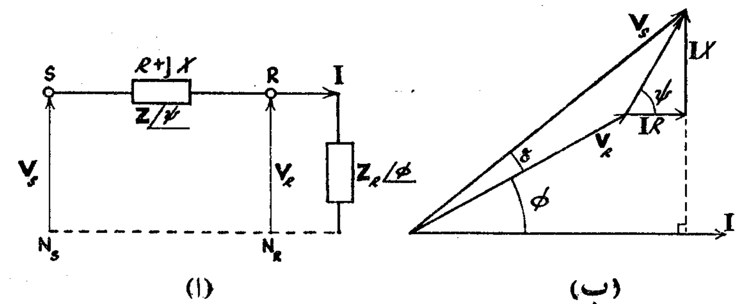
هنا سوف تعامل نظرية خطوط نقل القدرة لظروف الحالة المستقرة فقط . اما اشتغالها تحت الظروف العابرة فستتم مناقشته في الجزء الثاني من هذا الكتـــــاب .

1.2 الخطوط القصيرة Short lines

1.2.1 طرق التحليل Analytical Methods

يوجد في بريطانيا عدد كبير من خطوط النقل لها اطوال مسارات اقل من 80 كيلو مترا . لذا فان كل واحد من هذه الخطوط يمكن تمثيله بالتقريب بدائرة توال مكافئة كما في الشكل 1.1 (أ) . ويمكن ان تمثل هذه الدائرة نفسها مولدا (انظر الفصل السابع) ومحول قدرة اذا ماامكن اهمال دائرة الاثارة (انظر الفصل السادس) . ويمكن تطبيق نظرية الخط القصير على اجزاء واسعة من الشبكـــــة الكبـــــرى .

تذكر الطالب أن دائرة متوازنة ثلاثية الطور ، ترتبط مع مصدر وحمل مربوطين بشكل نجمي ، يمكن ان تمثل بمخطط احادي الطور (خط مفرد) ، وبما ان حاصل الجمع الطوري للتيارات في الخطوط الثلاثة يكون صفرا ، فسوف لايمر



الشكل 1.1. خط قصير

(أ) دائرة التوالي المكافئة (ب) المخطط الطوري

ψ = زاوية ممانعة الخط $X = 2\pi fL$

δ = زاوية الحمل (او القدرة) $\tan \psi = X/R$

تيار بين نقطتي المحايد N_S و N_R حتى لوكانتا مربوطتين سوية بسلك رابع . لذا فانه لايمكن ان يكون هناك فرق جهد بين N_S و N_R . وللمحافظة على هذه الميزة في الدائرة الاحادية الطور ، فان موصل العودة المحايد (المرسوم بشكل منقط) يجب ان يعد بدون ممانعة . وتكون N_S اعتياديا عند جهد الارض (الا خلال ظروف العطل المحتملة) وكذلك هي الحالة للنقطة N_R . خلال هذا الكتاب سوف تفرض جميع الاحمال على انها متوازنة وثلاثية الطور (الا اذا ذكر خلاف ذلك) .

عند العمل مع دوائر متوازنة ثلاثية الطور يفترض عادة أن الفولتيات المعروضة جميعاً تكون قيم خط الى خط ، وان التيارات جميعاً هي تيارات الخطوط ، وان الفولت امبيرات جميعا (قدرة وكذلك قدرة متفاعلة تكون ثلاثية الطور) وان عوامل القدرة جميعاً تكون عوامل القدرة للطور (جتا الزاوية بين فولتية الطور وتيار الطور المناظر) .

وكذلك فان أجوبة الاسئلة تكون اعتياديا معطاة في صيغة مماثلة لما ورد سلفاً ، ولكن في جميع الحسابات ينصح الطالب باستخدام الفولتية بين الطور والمحايد (في الربط النجمي)،وتيار الطور وممانعة الطور (تكون قيم الممانعات دائماً لكل طور) .في هذا الكتاب تستخدم الحروف الغامقة الكبيرة نوع (V) للدلالة على كمية ج . م . ت والتي تتغير بشكل جيبـي مع الزمن (كميات التيار المستمر d.c تظهر في الفقرة 5.9 فقط) وذلك عندما يتعلق الامر بالطبيعة الطورية لهذه القيم . رموز الحروف الطباعية المائلة (V) أو |V| تشير أيضاً الى قيمة ج . م . ت ولكن عندما يتعلق الامر بالمقدار وليس بالطور . وقيمة الذروة أو الاتساع لكمية متناوبة هي $\sqrt{2}V$. ومع أن هناك كميات مركبة مثل الممانعـة Z وثوابت خط النقل D, C , B, A لا تتغير مع الزمن الا أنه يرمز لهـا بالحروف الطباعية الكبيرة (الغامقة) وذلك عندما يستوجب استخدام كمياتها المركبة بدلا من مقاديرها . وعندما تكتب بالحروف الطباعية المائلة (Z) فان المقدار وحده يكون هو المطلوب . وبما أن هناك كميات أخرى مثل المحاثة L والمتسعة C والمقاومة R والمفاعلة X تكون غير مركبة سيرمز لها بالحروف المائلة في الاحوال جميعا .

ان فولتية نهاية الارسال $\mathbf{V}_S$ وفولتية نهاية الاستلام $\mathbf{V}_R$ هما قيم خط الى محايد (لكل طور نجمي) ويساويان قيم خط الى خط المناظرة مقسومة على $\sqrt{3}$. وعليه فمن الشكل 1.1 (ب) وعند ما تكون ظروف جهة الحمل معلومة فان

$$V_S = [(V_R \cos \phi + IR)^2 + (V_R \sin \phi + IX)^2]^{\frac{1}{2}} \text{ volts} \qquad [1.1]$$

ويكون عامل القدرة لنهاية الارسال

$$\cos(\phi + \delta) = (V_R \cos \phi + IR)/V_S \qquad [1.2]$$

والذي منه يمكن ايجاد كفاءة النقل والمعلومات كافة عن نهاية الارسال . يمكن اعادة رسم الشكل 1.1 (ب) كما في الشكل 1.2 وذلك لتوضيح الحسابات الخاصة لفولتية الارسال $\mathbf{V}_S$ باستخدام ترميز (i) مع $\mathbf{V}_R$ بوصفها مطاوراً مرجعاً . لذا

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_S &= \mathbf{V}_R + \mathbf{IZ} \qquad [1.3] \\ &= V_R\underline{/0^\circ} + I\underline{/-\phi} \times Z\underline{/\psi} \\ &= V_R + IZ\underline{/\psi - \phi} \\ &= (\overline{oa}) + (\overline{ab} + \mathrm{j}\,\overline{bc}) \end{aligned}$$

صيغة تربيعية : $= (\overline{ob})+j\,(\overline{bc})$

صيغة قطبية : $= V_S/\underline{\delta}$

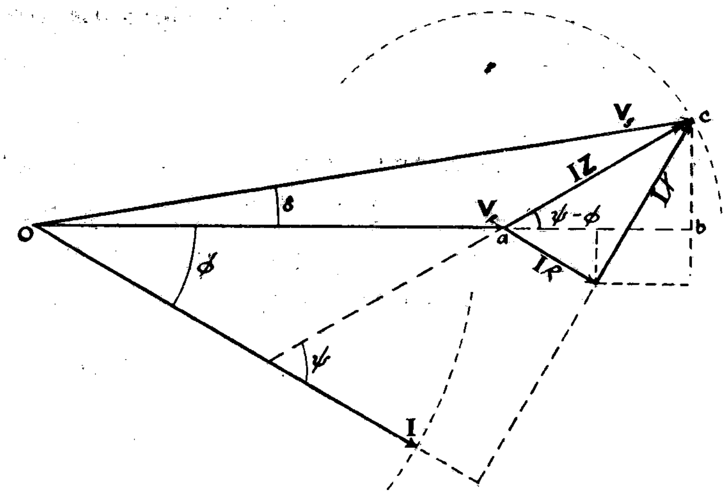
حيث ان $V_S = (\overline{ob}^2+\overline{bc}^2)^{\frac{1}{2}}$

و $\tan\delta = \overline{bc}/\overline{ob}.$

وتكون المعادلة [1.3] صحيحة في نظم الوحدات الاعتيادية وكذلك في نظام نسبة الوحدة (انظر الملحق 1) .

تعرف فولتية الممانعة بانها حاصل الضرب العددي IZ على افتراض أن التيار I هو التيار المقنن . الا اذا أعطيت كمية أخرى غيره . عليه فان فولتية الممانعة عند التيار المقنن تكون ثابتة لدائرة معلومة وهي غير معتمدة بصورة خاصة على عامل القدرة. واذا قسمت فولتية الممانعة على الفولتية المقننة (الاساس) فانها تصبح ممانعة الدائرة بصيغة نسبة الوحدة المناظرة الى القدرة المقننة (MVA،) (أنظر الملحق 1).

يعرف هبوط الفولتية على طول خط نقل بانه الفرق العددي بين فولتية نهاية الارسال وفولتية نهاية الاستلام على افتراض الاشارة الى التيار المقنن والفولتية المقننة عند نهاية الاستلام . الا اذا ذكر خلاف ذلك .



الشكل 1.2. مخطط طوري لخط قصير يبين المحل الهندسي لفولتية الارسال Vs لتيار ثابت I . عند عامل قدرة حمل متغير .

بالنظر الى الشكل 1.2 يتبين ان الانتظام يتناسب مع تيار الحمل (على الطالب ان لايخلط هذه الملاحظة بالملاحظة السابقة وهي ان الانتظام يحسب عادة عند التيار المقنن). تكون المعادلة [1.6] معقولة من حيث الواقع لعوامل القدرة المتأخرة العادية ولـكن يجب عدم استعمالها لعوامل القدرة المتقدمة . يستخلص من [1.6] ان الانتظام يكون اقصى ما يمكن ويساوي IZ وذلك عندما تكون ϕ (المتأخرة) $= \psi$: على الطالب ان يستنبط من الشكل 1.2 ان التعبير السالف مضبوط وليس تقريبياً . (عدا التقريبات التي تم عملها للخطوط القصيرة نفسها). وبقسمة المعادلة [1.6] على الفولتية المقننة. ينتج

$$\text{انتظام الفولتية} \simeq R_{pu} \cos \phi + X_{pu} \sin \phi \quad \text{بنسبة الوحدة}$$

$$\simeq Z_{pu} \cos (\psi - \phi) \qquad [1.7]$$

ينصح الطالب بعدم حفظ التقريبات في [1.6] أو [1.7] ولاحفظ خطوط التركيب في الشكل 1.2 التي منها تم اشتقاق المعادلة [1.6] ،ولـكن يجب معرفة كيفية ايجاد القيمة الصحيحة للفولتية V_S من [1.1] او [1.3] وتعويضها بعد ذلك في المعادلة [1.5] .

لمعظم خطوط النقل العملية ، لايستحب ان تزيد IZ عند الحمل المقنن عن 10% من الفولتية المقننة V_R وان تكون زاوية الحمل (او القدرة) δ بضع درجات فقط . ان معظم المخططات الواردة في هذا الفصل تبين IZ وكذلك δ بصورة مبالغ بها وذلك لجعل هذه المخططات اوضح .

مثال محلول *1.1*

خط قصير ثلاثي الطور ، 33 ك.ف يجهز حملاً مقداره 7 MW بعامل قدرة متأخر قدرة 0.85 وفولتية حمل 33 ك.ف. فاذا كانت ممانعة التوالي للخط تساوي 20+j 30 اوم / طور ، فاحسب فولتية الارسال وكذلك زاوية الحمل .

الحل

الفولتية الاساس $\mathbf{V}_R = (33/\sqrt{3})\underline{/0^\circ} = 19{\cdot}07\underline{/0^\circ}$ kV/phase

$$\mathbf{I} = (7\times 10^6/\sqrt{3}\times 33\,000\times 0{\cdot}85)(0{\cdot}85-j\,0{\cdot}527)$$
$$= 144{\cdot}1(0{\cdot}85-j\,0{\cdot}527) = 122{\cdot}3-j\,75{\cdot}9 \text{ A}$$
$$\mathbf{IZ} = (122{\cdot}3-j\,75{\cdot}9)(20+j\,30) = 4723+j\,2151 \text{ V/}$$ طور
$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R+\mathbf{IZ} = 23\,793+j\,2151 = 23\,880\underline{/5{\cdot}18^\circ} \text{ V/}$$ طور

أو 41·4 kV (خط).

زاوية الحمل $= 5{\cdot}18^\circ$.

وبأسلوب آخر :

$$V_R\cos\phi_R+IR = 19\,070\times 0{\cdot}85+144{\cdot}1\times 20 = 19\,082$$
$$V_R\sin\phi_R+IX = 19\,070\times 0{\cdot}527+144{\cdot}1\times 30 = 14\,353$$
$$V_S = (19{\cdot}08^2+14{\cdot}35^2)^{\frac{1}{2}} = 23{\cdot}88 \text{ kV/phase}$$
or 41·4 kV (line)
$$\phi_S = \phi_R+\delta = \tan^{-1}(14{\cdot}35/19{\cdot}08) = 36{\cdot}98^\circ$$
$$\delta = \phi_S-\phi_R = 36{\cdot}98-31{\cdot}8 = 5{\cdot}18^\circ.$$

وبأسلوب آخر :

فقد القدرة في الخط $= 3I^2R = 3\times 144{\cdot}1^2\times 20\times 10^{-6} = 1{\cdot}252$ MW

القدرة الداخلة للخط $= 8{\cdot}252$ MW

فقد الـ VAr في الخط $= 3I^2X = 3\times 144{\cdot}1^2\times 30\times 10^{-6} = 1{\cdot}878$ MVAr متأخر

دخل الـ VAr في الخط $= (7\times 0{\cdot}527/0{\cdot}85)+1{\cdot}878 = 6{\cdot}218$ MVAr متأخر

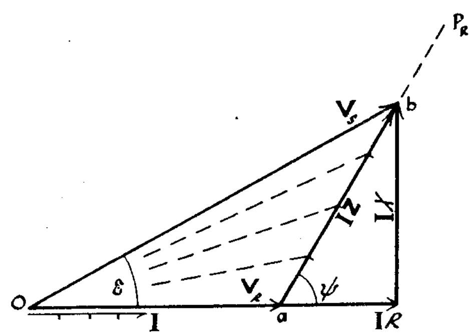
دخل الـ VA في الخط $= (8{\cdot}25^2+6{\cdot}22^2)^{\frac{1}{2}} = 10{\cdot}32$ MVA

$$V_S = 10{\cdot}32/\sqrt{3}\times 144{\cdot}1 = 41{\cdot}4 \text{ kV}$$ (خط)
$$\cos\phi_S = 8{\cdot}25/10{\cdot}32 = 0{\cdot}799$$ متأخر
$$\phi_S = 36{\cdot}98^\circ$$
$$\delta = 36{\cdot}98 - 31{\cdot}8 = 5{\cdot}18^\circ.$$

1.2.2 الطرق البيانية ، مخططات الاداء ، اشتغال منظومة القدرة

GRAPHICAL METHODS; PERFORMANCE CHARTS; OPERATION OF A POWER SYSTEM

سوف نتطرق الان الى مناقشة طريقة بيانية للتعامل مع خط قصير . هنا نذكر الطالب بان هذه المناقشة يمكن ان تطبق على المولد ايضاً . مع ان مخططات الاداء التي نحن بصدد مناقشتها نادراً ما ترسم بمقياس معين ، الا انها مفيدة جداً في اعطاء صورة منظورة لتصرف منظومة قدرة معينة وذلك عندما يتغير الحمل في مقدار قيمته وكذلك عامل قدرته في البداية سنناقش مخططات نهاية الاستلام التي تفرض ان فولتية نهاية الاستلام تكون ثابتة عند النهاية البعيدة لخط ذي ممانعة ثابتة .



الشكل 1.3. خط قصير عليه حمل ذو عامل قدرة (واحد) ، V_R = ثابت

يبين الشكل 1.3 المخطط الطوري لخط قصير معلوم يجهز قدرة عند فولتية ثابتة وعامل قدرة واحد مقاسة عند نهاية الاستلام للخط . في حالة اللاحمل سوف تنطبق V_S مع V_R . اذا ازداد الحمل بكميات صغيرة متساوية فان طرف المطاور V_S سوف يتحرك على طول $\overline{ab}$ بكميات صغيرة متساوية . يشار الى الخط $\overline{ab}$ بانه محور القدرة اذا ما أمكن تقسيمه بوحدات القدرة المجهزة P_R (بالميكاواط MW). ان محور القدرة هذا يتقدم على V_R بزاوية ثابتة ψ .

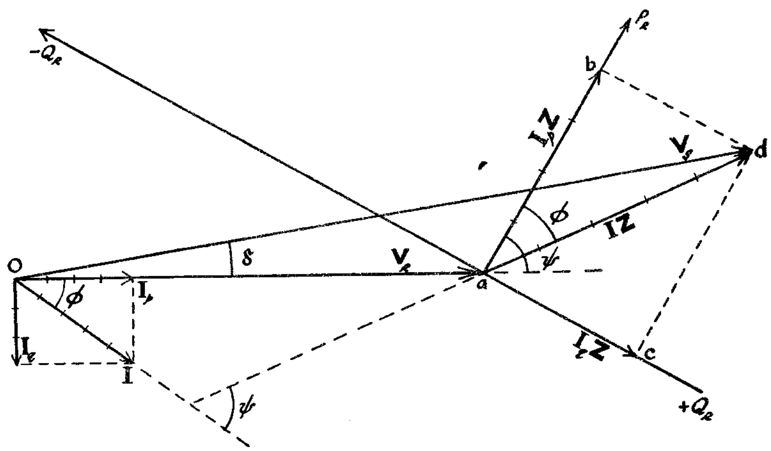
واذا ما تغير عامل القدرة نحو الصفر متأخراً ، فان I و IZ سوف يتحركان كلاهما بزاوية مقدارها 90° باتجاه عقرب الساعة من مواضعهما المبينة في الشكل 1.3 .

اذا ماتزايد التيار ايضاً بالزيادات الصغيرة المتساوية نفسها كالسابق ،فسوف يتحرك طرف المطاور V_S بخط مستقيم عمودياً على محور القدرة وبزيادات صغيرة متساوية وكلٌ منها يساوي تلك التي على طول محور القدرة . المحور الجديد هذا يسمى محور القدرة المتفاعلة (Q_R) (الـ var (الفار) اوالفولت أمبيرات المتفاعلة) حيث يقسم مقياسه بالميكافولت أمبير المتفاعلة MVAr المتأخرة (انظر الملحق 4).

يوضح الشكل 1.4 مخطط نهاية الأستلام لحالة عامة لحمل ذي عامل قدرة متأخر $\cos\phi$. وهذا المخطط يمكن الحصول عليه بطريقة تراكب القدرة والقدرة المتفاعلة . مقاييس الميكاواط MW على ab. ، وللميكافار المتأخرة على ac وللميكا فولت أمبير MVA على ad تكون جميعها متساوية عددياً . وبما ان V_R وكذلك Z يكونان ثابتين عليه .

$$IZ \propto I \propto V_R I \propto$$ (الحمل VA/ طور)

وهذه الحجة تكون صحيحة ايضاً لمركبتي تيار الحمل .



الشكل 1.4. مخطط نهاية الأستلام لخط قصير (V_R = ثابت)

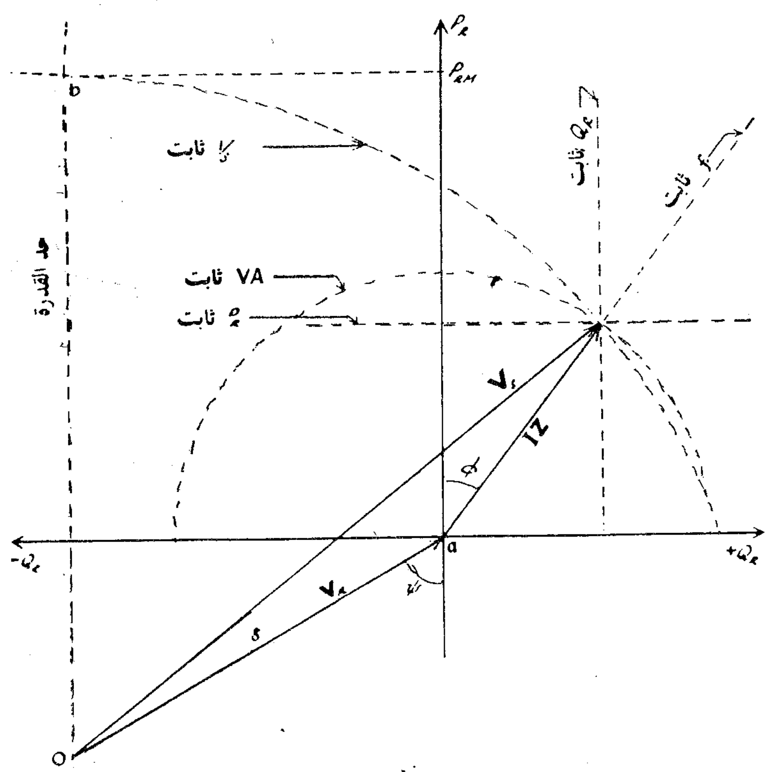
P_R = قدرة الحمل (المحل الهندسي للفولتية V_S لحمل ذي عامل قدرة واحدة) .

Q_R = القدرة المتفاعلة للحمل $vars$ (المحل الهندسي للفولتية V_S لحمل ذي عامل قدرة صفري) .

وفي الشكل 1.5 مخطط لاداء نهاية الاستلام لخط قصير حيث يوضح المحلات الهندسية للفولتية V_S لظروف اشتغال متغيرة ومتعددة (ولكن V_R ثابتة فيها جميعاً) .

تامل حملا ما يأخذ قدرة ثابتة عند عامل قدرة متغير . فعندما تكون عوامل القدرة متأخرة وواطئة القيمة تكون $V_S > V_R$. بينما في حالة كون عوامل القدرة متقدمة وواطئة قد يكون V_S اقل من V_R وهناك عامل قدرة معيناً ومتقدماً تكون فيه $V_S = V_R$. يعطي المخطط قيمة V_R المطلوبة لتفي بالطلب لحمل معين عند نهاية الاستلام لخط معلوم .

تامل الان المنوب الموجود عند نهاية الارسال للخط . والذي عليه ان يجهز هذا الطلب للحمل . فالشكل 1.5 يحقق حالة المولد وحده اذا غيرت V_S الى ق . د . ك الدائرة المفتوحة E_o وكذلك V_R الى فولتية الطرف V ومثلت Z الممانعة التزامنية (الثابتة) للمنوب .



الشكل 1.5. المحال الهندسية للفولتية V_S لخط قصير (عندما تكون V_R ثابتة)

لقد نوقشت نظرية المنوب بشيء من الاسهاب في الفصل 7 ، ولكن ما سنذكره هنا كاف لغرضنا الحاضر . تتم السيطرة على E_o بوساطة اثارة المنوب . واذا طاف منوب على قضبان توزيع مكهربة (وهذا يعني انه مربوط الى قضبان التوزيع ولكنه لايقوم بتجهيز الطاقة لاي حمل كهربائي) فان تجهيز البخار الى المدور التوربيني يكون كافياً للتغلب على المفاقيد في هذا المنوب . واذا ازداد تجهيز البخار ، فان توازن القدرة يفقد وتمتص القدرة الاضافية مؤقتاً على هيئة طاقة حركية بوساطة المنوب بحيث تزيد من سرعته قليلاً ولهذا تتقدم $\mathbf{E}_o$ في الطور بالنسبة الى $\mathbf{V}$ ويعمل حينئذ المنوب بعامل قدرة متقدم . وعندما يكون خرج المنوب من القيمة بحيث يتم استرجاع توازن القدرة (الدخل = الخرج + المفاقيد) يتزامن المنوب ويدور بسرعة تزامنية .

واذا ازدادت الاثارة فسوف ينتقل رأس نهاية المطاور $\mathbf{E}_o$ افقياً الى اليمين ويعمل المنوب بعامل قدرة متأخر . لذلك فعند التحكم بالاثارة وبكمية البخار المجهز بصورة ملائمة يتمكن المنوب من تجهيز الامور الضرورية لنهاية الارسال ليمكن قيام خط معين بتجهيز حمل معلوم . من الضروري ملاحظة ان Q تكون موجبة عندما يجهز المولد قدرة متفاعلة (vars) متأخرة الى حمل حثي (انظر الملحق 4) .

عند الاخذ بنظر الاعتبار خط النقل منفرداً ، فالشكل 1.5 يبين المسار الهندسي للفولتية $\mathbf{V}_S$ والتي تكون ثابتة في هذه الحالة (ثابت = V_S) وعندما تتقدم $\mathbf{V}_S$ طورياً (بسبب زيادة تجهيز البخار) تزداد القدرة المجهزة لحمل مربوط في نهاية الخط الى ان ينطبق $\mathbf{V}_S$ على $\overline{ob}$. وعند تقدم طور V_S اكثر يؤدي ذلك الى تقليل القدرة المجهزة ، عليه فان هناك حداً لكمية القدرة التي يمكن ان يجهزها خط معين عند اشتغاله بقيم ثابتة للفولتيتين V_S و V_R . ويسمى هذا الحد حد القدرة للخط ويرمزله بـ (P_{RM}) حيث يكون دالة للفولتية V_S ويزداد عند ازديادها . وعند حد القدرة ، اي في حالة $\delta = \psi$ ، يتناسب تيار الخط مع $\overline{ab}$ وقد تتجاوز قيمته كثيراً قيمة التيار المقنن للخط وكذلك يكون عامل القدرة ذا قيمة واطئة نسبياً ومتقدماً (جتا الزاوية بين $\overline{ab}$ ومحور القدرة) . عليه يكون حد القدرة ظرف اشتغال غير عملي وفي اي حال لايمكن التعامل مع خط النقل لوحده بدون الرجوع الى منوبه الذي يجهزه بالطاقة .

الان سنتأمل تطبيق الشكل 1.5 على منوب منفرد . اذا زيد تجهيز البخار بصورة بطيئة ، مع بقاء الاثارة ثابتة ، فان $\mathbf{E}_o$ (عوضاً عن $\mathbf{V}_S$)تتقدم في الطور وتزداد القدرة

الخارجة للمنوب حتى تنطبق E_o على $\overline{ob}$. ولغاية هذا الظرف تكون مجموعة التوليد (المولد) في حالة استقرار حيث يستطيع المنوب العمل بسرعة تزامنية لكمية معينة من البخار المجهز . هذا يكون باهمال الظروف العابرة التي قد تنتج عن اي تغير مفاجيء ضمن المنظومة . على اية حال اذا تقدمت E_o بالطور الى مابعد $\overline{ob}$ ، والذي ينشأ عن زيادة في البخار المجهز ، فعند ذلك تقل القدرة الكهربائية الخارجة من المنوب . عليه فان الفرق بين القدرة الداخلة الى المنوب والقدرة الخارجة منه ، يجب ان يمتص داخل المجموعة نفسها في صيغة طاقة حركية . لهذا السبب تزداد سرعة المنوب ولايعود يشتغل عند سرعته التزامنية . يكون المنوب في هذه الحالة غير مستقر لان اية زيادة اخرى في القدرة الداخلة سوف تؤدي الى نقص في القدرة الخارجة . هناك حد معلوم للقدرة المتيسرة من ايـة مجموعة توليد تعمل عند قيم E_o و V ثابتة ، وهذا الحد يسمى حد الاستقرارية في حالة الاستقرار . تعني عبارة (حالة الاستقرار) زيادة تجهيز البخار للمنوب بصورة بطيئة ، والحدود التي يمكن للمنوب ان يبقى مستقراً ضمنها سيتم التطرق اليها في الفصل 7 ، بينما سيناقش الجزء الثاني من هذا الكتاب استقرارية منظومةالقدرة في الحالة العابرة وبصورة مفصلة .

بما أن احدى الفرضيات التي وضعت في تطوير مخططات الاداء هي اعتبار الممانعه ثابتة فعليه تفرض ممانعة المنوب كونها ثابتة (انظر الفصل 7) . هناك فرض آخر ضمن المناقشة السالفة وهو ان المنوب يعمل على التوازي مع الشبكة الكبرى وهي التي تقوم بتثبيت السرعة التزامنية .

واذا نظر الى كل من المنوب والخط وكذلك الحمل على أنها مجموعة مستقلة وغير مربوطة الى الشبكة الكبرى فان أية زيادة في تجهيز البخار ستؤدي حتماً الى زيادة في تردد المنظومة وبذلك تجبر الحمل على تقبل قدرة اكثر وهذا يتضح من زيادة السـرع لمحركات التيار المتناوب الموجودة ضمن الحمل ، وأية زيادة في اثارة المنوب ستؤدي الى زيادة القدرة المتفاعلة (vars) المتأخرة والخارجة من المنوب (انظر الشكل 1.4) ولـكن هذا يؤدي ايضاً الى زيادة فولتية المنظومة واجبار الحمل على اخذ تيار اثارة اكبر لمحولاته ولمحركاته الحثية . واذا ازدادت فولتية الحمل فسوف تزداد القدرة المأخوذة من قبل اي مقاومة حمل (تسخين مثلاً) . لذا فان اي ارتفاع في تردد المنظومة وفولتيتها يشير الى ان المنوب يقوم بتوليد يفوق متطلبات الحمل اللازمة . وعلى العكس ، اذازادت متطلبات الحمل فان تردد المنظومة وفولتيتها سينخفضان ، والانخفاض في التردد سوف يؤدي

الى تشغيل متحكمات البخار الذاتية التي سترفع بدورها من كمية البخار المجهز وترفع بذلك التردد . اما الهبوط في الفولتية فسوف يؤدي الى تشغيل منظمات الفولتية الذاتية (AVR) التي ستزيد من الاثارة وبالتالي الى زيادة الفولتية نفسها .

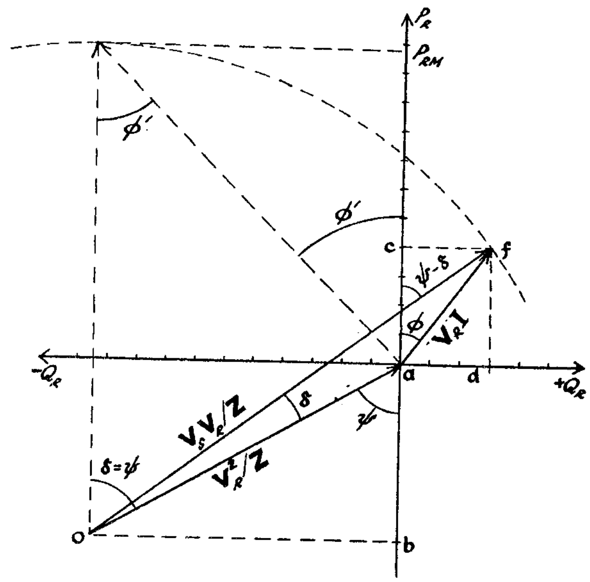
يمكن تطبيق هذه العلائق على منظومة الشبكة الكبرى بوصفها منظومة قدرة واحدة . لذلك اذا كان تردد الشبكة الكبرى وفولتيتها ثابتين فان التوليد وكذلك متطلبات الحمل يكونان متساويين ايضاً (على فرض ان الفقد في المنظومة يكون جزءاً من الحمل نفسه) . (لمعلومات اكثر تفصيلاً انظر الفصل 7).

للاغراض التدريسية . ينصح الطالب برسم مخططات الاداء وذلك باستخدام اسلوب الطور الواحد واتخاذ الفولتية مقياساً للرسم .

من المناسب في بعض الاحيان رسم مخططات الاداء بمقياس الفولت امبير وليس بمقياس الفولتية المشار اليه في اعلاه . في الشكل 1.5 يتناسب IZ مع فولت امبير الحمل حيث ان V_R و Z كليهما يكون ثابتاً . ويمكن تغير التناسبية هذه الى مساواة وذلك بضرب IZ وكل من V_R و V_S كذلك بالقيمة V_R/Z (انظر الشكل 1.6) . بما أن كلا من V_SV_R/Z و V_R^2/Z له ابعاد الفولت امبير . فان عموم المخطط يمكن رسمه بمقياس الفولت امبير نفسه . مما يجب ملاحظته ان الشكل 1.6 يحتوي على كميات مركبة وليس مطاورات (انظر الملحق 4) .

اذا ضرب كل متجه من المتجهات الثلاثة في الشكل 1.6 بالرقم 3 (وهذا يعني ضرب المقياس نفسه في 3) . فان $\overline{af}$ سوف يمثل فولت امبير لحمل ثلاثي الطور . يتم الحصول على المعامل 3 ذاتيا فيما لو استخدمت قيم خط الى خط لكل من V_S , V_R بدلا من قيم خط الى محايد .

وقد تم اشتقاق $\overline{af}$ في الشكل 1.6 من IZ . عليه اذا ضرب I باي معامل K وقسمت Z على المعامل K نفسه (وهذا يعني تقسيم مسار الطور على K) فان af لايتغير . اي ان $\overline{af}$ ثابت لايعتمد على قيمة k. لذا فان af يمكن ان يمثل حاصل ضرب فولت امبير الحمل مع طول الخط مع الأخذ بنظر الاعتبار تناسب كل منهما عكسيا مع الاخر . وعمليا قد ترسم مخططات اداء الخطوط بمقياس ميكا فولت امبير – كيلو متر



الشكل 1.6. مخطط اداء خط قصير يبين الحالات عند حد القدرة .

(MVA-km) للاطوار الثلاثة . عليه فاذا كانت $\bar{a}j$ على مثل هذه المخططات تساوي 200 ميكافولت امبير–كيلومتر فيمكن تفسيرها بكونها 20 ميكافولت امبير مجهزة بخط طوله 10 كيلومترات أو 10 ميكافولت امبير مجهزة بخط طوله 20 كيلومتر . وترسم المخططات لفولتيه معينة ولنوع معين من انواع الخطوط ولكنها لاتعتمد اساساً على مسار الطول لهذه الخطوط . ولتوخي الفائدة ترسم مثل هذه المخططات عادة بجعل المحور السيني الموجب ($+x$) - محور القدرة والمحور الصادي الموجب ($+y$) محور القدرة المتفاعلة (vars متأخرة عن الحمل) . مما يجب ملاحظته ان مثل هذه المخططات سوف تبين زيادة زاوية القدرة δ باتجاه عقرب الساعة وهذا عكس ماهو متعارف عليه اعتيادياً .

ويمكن رسم مخططات الاداء على اساس ثبوت فولتية نهاية الارسال ، وتدعى هذه المخططات بمخططات نهاية الارسال . اما رسمها فيترك الى الطالب تمريناً على هذا الموضوع .

مثال محلول 1.2

ارسم مخطط اداء نهاية الاستلام للخط والحمل المشار اليهما في المثال المحلول 1.1 لفولتية نهاية استلام مقدارها 33 ك . ف وبالمقاييس الاتية :
(أ) فولتية / طور، (ب) ميكافولت امبير (MVA) للاطوار الثلاثة (ج) ميكا فولت أمبير – كيلو متر (MVA-km) للاطوار الثلاثة ثم احسب (i) فولتية نهاية الارسال ، (ii) عامل القدرة للحمل الكلي الذي سيحدد قيمة فولتية الارسال الى 36 ك . ف ، افرض ان أجهزة تحسين عامل القدرة تضيف 500 كيلوواط للحمل الاصلي ، (iii) حد القدرة للخط لهبوط فولتية قدرة 10% .

الحل :

(أ) الفولتية / الطور

لاجل الحصول على دقة معقولة يجب ان تشغل المخططات نصف صفحة قياسية في الاقل . نذكر ان حد القدرة يحتاج لمقياس مناسب وعليه تؤخذ 1 سم = 2 كيلو فولت / طور . لذا فان طول V_R يكون

$(33/\sqrt{3})/2 = 19{\cdot}07/2 = 9{\cdot}53$ سم

والزاوية بين $\mathbf{V}_R$ ومحور القدرة السالب تكون

$$= 90° - \tan^{-1}(20/30) = 56{\cdot}3°.$$

ويرسم محور القدرة عادة باتجاه المحور الصادي الموجب ($+y$)
ويرسم محور القدرة المتفاعلة (var) للحمل باتجاه المحور السيني الموجب ($+x$) . عليه للحمل المذكور يكون

$IZ = 144{\cdot}1 \times 36{\cdot}05 = 5190 \text{ V} = 2{\cdot}59$ سم

حيث يرسم هذا بزاوية باتجاه عقرب الساعة من محور القدرة مساوية الى

$$\phi_R = \cos^{-1} 0{\cdot}85 = 31{\cdot}8°.$$

(i) وفقاً للمقياس طور / ك . ف $23{\cdot}9$ = سم $V_S = 11{\cdot}95$ أو $41{\cdot}4$ كيلو فولت (خط) .

(ii) وفقاً للمقياس طور / ك . ف $V_S = 36/\sqrt{3} = 20{\cdot}8$
$= 10{\cdot}4$ سم

وتيار الطور الناتج بسبب الحمل الكلي هو

$$I_p = 7.5\times10^6/\sqrt{3}\times 33\,000 = 131{\cdot}3 \text{ A.}$$
$$_pZ = 131{\cdot}3\times36{\cdot}05 = 4730 \text{ V } / \text{ طور}$$
$$= 2{\cdot}36 \text{ سم}$$

هذا الطول يقاس على محور القدرة ، وعند انزال خط عمودي على محور القدرة سوف يقطع دائرة بنصف قطر مقداره 10.4 سم عند الجواب على هذه المسألة ، اما الزاوية بين IZ الجديد هذا ومحور القدرة تستخرج بالقياس وعليه تكون $22{\cdot}5°$ ، وعامل القدرة الكلي يكون $0{\cdot}92$ ، متقدماً .

(iii) ووفقاً للمقياس ايضاً تكون $V_S = 1{\cdot}1\times19{\cdot}07 = 20{\cdot}99$ ك ف / طور وتساوي الى $10{\cdot}5$ سم . وبرسم خط عمودي على محور القدرة ومماس لدائرة نصف قطرها $10{\cdot}5$ سم ، فالطول المقاس على محور القدرة يكون 5 سم أو 10 ك . ف / طور . اما مركبة التيار المنطبقة الطور مع الفولتية عند حد القدرة فتكون :

$$10\,000/36{\cdot}05 = 277{\cdot}5 \text{ A}$$

ويكون حد القدرة للاطوار الثلاثة

$$\sqrt{3}\times33\times0{\cdot}2775 = 15{\cdot}83 \text{ MW}$$

(ب) الميكافولت امبير (MVA) للاطوار الثلاثة .

ان مقياس الفولتية الذي تم استخدامه في اعلاه يمكن تحويله الى مقياس قدرة MVA للاطوار الثلاثة وذلك بملاحظة ان الحمل بالميكافولت – امبير للأطوار الثلاثة $7/0{\cdot}85 = 8{\cdot}23$ ميكافولت أمبير كان قد عبر عنه بطول $2{\cdot}6$ سم . لذا فان مقياس الـ MVA للاطوار الثلاثة يكون $8{\cdot}23/2{\cdot}6 = 3{\cdot}16 = 2{\cdot}36$ cm ، والحمل الجديد ومقداره $7{\cdot}5$ MW يعبر عنه بوساطة $7{\cdot}5/3{\cdot}16 = 2{\cdot}36$ cm (كما سبق) .

من المعتاد جداً اختيار مقياس MVA ملائم للحصول على مقياس للفولتية منه . خذ مقياساً ما وليكن 1 سم = 2 ميكافولت أمبير (للاطوار الثلاثة) ، وبالاشارة الى الشكل 1.6 ، فان V_R الاصلي (بالكيلو فولت – خط) يكون الان

$$V_R^2/Z = 33^2/36{\cdot}05 = 30{\cdot}2 \text{ MVA} = 15{\cdot}1 \text{ cm}$$

ومقياس فولتية الخط بالكيلوفولت يكون $33/15{\cdot}1 = 2{\cdot}18$ ك . ف خط / سم والحمل الاصلي الذي مقداره $7 \text{ MW} = 7/2 = 3{\cdot}5$ سم على طول محور القدرة .

اما V_S الاصلية (والتي تم تحويلها الان الى $V_S V_R/Z$) فتستخرج بالقياس لتكون 19 سم = 41·4 ك. ف. باستطاعة الطالب الان ان يحصل على الاجوبة الباقية لهذا السؤال .

(ج) MVA - كم ، للاطوار الثلاثة .

افرض ان طول الخط هو 50 كيلومتراً ، لذا فان الحمل بالميكاواط MW × طول الخط بالكيلومتر 7 × 50 = MVA 350 كلم للاطوار الثلاثة وهذا يمثل طول مقداره 3·5 سم . لذا فان المقياس يكون 350/3·5 = MW 100 كم / سم للاطوار الثلاثة (او MVA كم / سم) . اما المخطط فيكون نفسه كما في (ب) اعلاه : وذلك لان مقياس الفولتية هو نفسه . ويمكن رسم دوائر تمثل انتظام فولتية ثابتة وخطوط شعاعية تمثل عوامل قدرة ثابتة. ولعامل قدرة معين ولفولتية نهاية ارسال معينة فان نقطة الاشتغال على المخطط تكون ثابتة ايضا حيث يمكن عندها تعيين مقياس للميكاواط MW كلم وتقسيمه حيث انه اذا علم احدهما فيمكن ايجاد الاخر. وهذا يوضح ان هبوط الفولتية على طول الخط يعتمد على حاصل ضرب طول الخط في الحمل .

على الطالب ان يبين لنفسه ان الشكل 1.6 يمكن رسمه مباشرة بمقياس MVA كم للاطوار الثلاثة بتبديل Z التي تمثل الممانعة الكلية للخط بـ Z_1 التي تمثل الممانعة لكل كيلومتر . في هذه الحالة $Z_l = 36{\cdot}05/50 = 0{\cdot}721$ اوم / كم ، وعليه فان $V_R^2 Z_l = |33^2/0{\cdot}721 = $ MVA 1510 كم لذا فان V_R يمثل هنابالقياس ليكون $1510/100 = 15{\cdot}1$ سم (كما سبق) .

1.2.3 قوانين القدرة : حد القدرة في الحالة المستقرة

POWER FORMULAE: STEADY-STATE POWER LIMIT

اشارة الى الشكل 1.6 ، تكون القدرة المجهزة الى نهاية الاستلام للخط الذي ممانعته $Z = Z/\psi$ هي كالاتي :

$$P_R = \overline{ac} = \overline{bc} - \overline{ba}$$
$$= (V_S V_R/Z)\cos(\psi-\delta) - (V_R^2/Z)\cos\psi. \qquad [1.8]$$

وبالاسلوب نفسه فان القدرة المتفاعلة المجهزة

$$Q_R = (V_S V_R/Z)\sin(\psi-\delta) - (V_R^2/Z)\sin\psi. \qquad [1.9]$$

واذا كان V_S و V_R هما قيم الفولتية خط الى محايد (للطور النجمي) فان P_R وكذلك Q_R تكون قيمتاهما بالطور ايضا . واذا ضربت كل من P_R وكذلك Q_R في 3 ، باستخدام قيم خط الى خط للفولتيتين V_S و V_R فان المعادلات الناتجة تعطي قدرة الاطوار الثلاثة وكذلك القدرة المتفاعلة لها المجهزة لحمل متوازن . ويمكن الحصول على هذه المعادلات ايضا بالطرق التحليلية ، حيث يبين الملحق 4 امكانية التعامل مع الفولت أمبيرات على اساس كونها عددا مركبا حيث تكون مساوية الى حاصل ضرب مطاور الفولتية مع مترافق مطاور التيار حينما تعرف الـ vars المتأخرة بكونهـــا موجبة .

في الشكل 1.7 ، اخذ المطاور $\mathbf{V}_R$ كونه مرجعا (مطاور اسناد) وعليه فـــان ،

$$\mathbf{V}_R = V_R\underline{/0^\circ}$$
$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R + \mathbf{IZ}$$
$$\mathbf{I} = \mathbf{V}_S/\mathbf{Z} - \mathbf{V}_R/\mathbf{Z}$$
$$= (V_S/Z)\underline{/\delta-\psi} - (V_R/Z)\underline{/-\psi}.$$

ومترافق التيار $\mathbf{I}$ يكون

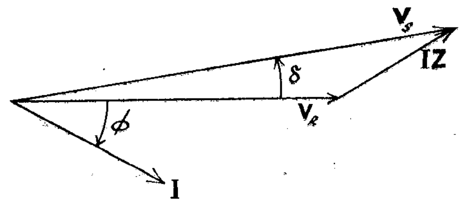
$$\mathbf{I}^* = (V_S/Z)\underline{/\psi-\delta} - (V_R/Z)\underline{/\psi},$$

والفولت أمبيرات المجهزة الى الحمل تكون

$$\mathbf{S}_R = \mathbf{V}_R\mathbf{I}^*$$
$$= (V_S V_R/Z)\underline{/\psi-\delta} - (V_R^2/Z)\underline{/\psi} \qquad [1.10]$$
$$= P_R + j\,Q_R,$$

حيث ان P_R و Q_R هما المركبتان المنطبقة الطور والعمودية على التوالي للقوة الكلية $\mathbf{S}_R$ المعطاة في المعادلتين [1.8] و [1.9] السالفتين . ان هذه المعادلات تكون مفيدة عند عدم معرفة تيار الخط (وخلافا لهذا فانه يجب استخدام المعادلات [1.7]

و [1.2] وكذلك [1.3] . فمثلا اذا اعطيت قيمة كل من P ، V_S ، V_R وكذلك Z فان [1.8] سوف تعطي δ التي بدورها تعوض في [1.9] لتعطي Q_R .



الشكل 1.7 .

يوضح الشكل 1.6 ان المسار الهندسي لـ $V_S V_R/Z$ يكون ثابتا (اي ان V_S ثابت) . ومعادلة هذه الدائرة يمكن ايجادها وذلك بحذف δ بين [1.8] و [1.9] باستخدام العلاقة التالية

$$\cos^2(\psi-\delta)+\sin^2(\psi-\delta)=1.$$

عليه فان

$$[P_R+(V_R^2/Z)\cos\psi]^2+[Q_R+(V_R^2/Z)\sin\psi]^2=(V_S V_R/Z)^2. \qquad [1.11]$$

وهذه عبارة عن معادلة دائرة اذا كانت كل من P_R و Q_R متغيرة ، والسؤال المطروح اعلاه يمكن حله باستخدام [1.11] .

ان اشتغال خط قصير معين بفولتيات ثابتة عند نهايتيه ، يكون له حد اعلى للقدرة يتمكن من تجهيزه وقد تمت مناقشة ذلك في الفقرة 1.2.2 (الشكل 1.6) . حيث يمكن استخلاص هذا الاستنتاج من المعادلة [1.8] . اذا كانت P_R دالة للزاوية δ فقط (جميع المعالم الاخرى تكون ثابتة) فان P_R تكون اعظم مايمكن عندما تكون $\delta=\psi$ ومقدار هذه القيمة العظمى تعطى كالاتي

$$P_{RM}=(V_S V_R/Z)-(V_R^2/Z)\cos\psi$$
$$=(V_S V_R/Z)-(V_R^2 R/Z^2). \qquad [1.12]$$

ان هذه توضح المعالم التي يعتمد عليها حد القدرة لخط ما . واذا كانت $R = 0$ فان الحد الثاني من المعادلة [1.12] يكون صفرا . اما اذا كانت $Z = KR$ و $V_S = V_R$ فان حديها يكونان بنسبة $1 : 1/K$. وتتغير قيمة K من 1 للخطوط الخفيفة الحمل ذات فولتية 11 ك . ف الى حوالي 8 للخطوط الثقيلة الحمل ذات فولتية 400 ك . ف.

عليه اذا كانت $V_S = V_R$ فان

$$\begin{aligned} P_{RM} &= (V_R^2/Z)(1-\cos\psi) \\ &= (V_R/Z)^2(Z-R). \end{aligned} \qquad [1.13]$$

تبين المعادلتان [1.12] و [1.13] أنه اذا ارتفعت الفولتيتان V_S و V_R ، بمقدار 10% فان حد القدرة سيرتفع بمقدار 20% .

عند حالة حد القدرة فان القدرة المتفاعلة المجهزة الى الحمل تعطى كالاتي

$$Q_R = -(V_R^2/Z)\sin\psi \qquad [1.14]$$

وتكون بذلك غير معتمدة على V_S (انظر الشكل 1.6) . اما الاشارة السالبة فتدل على ان الحمل هو مصب للقدرة المتفاعلة (vars) المتقدمة (تذهب الى ناحية الحمل) او انه مصدر للقدرة المتفاعلة المتأخرة (تذهب من ناحية الحمل الى المصدر) . (انظر الملحق 4 .)

باستخدام الشكل 1.7 على الطالب ان يشتق المعادلات الاتية للقدرة وال vars الذاهبة الى نهاية الارسال لخط قصير (تعرف ال vars المتأخرة الذاهبة الى نهاية الارسال بكونها موجبة)

$$P_S = (V_S^2/Z)\cos\psi - (V_S V_R/Z)\cos(\psi+\delta) \qquad [1.15]$$

$$Q_S = (V_S^2/Z)\sin\psi - (V_S V_R/Z)\sin(\psi+\delta). \qquad [1.16]$$

اذا كانت P_S دالة للزاوية δ فقط . فان P_S تكون اعظم مايمكن عندما تكون $(\psi+\delta) = 180°$: بما ان القيمة النموذجية للزاوية ψ هي حوالي $60°$. عليه تكون القيمة المقابلة للزاوية δ حوالي $120°$ (V_S تتقدم على V_R) . لذلك تكون القيمة العظمى للقدرة الداخلة :

$$P_{SM} = (V_S^2/Z)\cos\psi + (V_S V_R/Z)$$
$$= V_S^2 R/Z^2 + V_S V_R/Z. \qquad [1.17]$$

واذا كانت $V_R = V_S$ فعليه .

$$P_{SM} = (V_S/Z)^2(R+Z). \qquad [1.18]$$

والقدرة المتفاعلة الداخلة (vars) المقابلة لاعظم قدرة داخلة تعطى كالآتـي

$$Q_S = (V_S^2/Z)\sin\psi \qquad [1.19]$$

وتكون بذلك موجبة وغير معتمدة على V_R .

على الطالب ان يربط بعناية المعادلات اعلاه مع مخططات نهاية الارسال المقابلة لها ضمن ($V_S =$ ثابت) . يمكن ايجاد مؤشر لعامل القدرة عند طرف الحمل للخـط وذلك بتصور ان التيار I يتأخر عن IZ بالزاوية ψ .

1.2.4 السيطرة على فولتية خط شعاعي

VOLTAGE CONTROL OF A RADIAL LINE

هناك متطلب قانوني يقضي بان الفولتية عند طرف المستهلك يجب ان لاتتغير بنسبة اكثر من ±6% من القيمة المعلنة . من المحبذ ان الفولتية عند قضبان التوزيع في محطات التوليد والمحطات الثانوية يجب ان لاتتغير اكثر من ±10% حتى تعمل جميع الاجهزة والمعدات الثانوية الاخرى في المحطات بصورة مرضية عند فولتياتها المقننة اوقربها بحيث لاتجهد عوازلها بسبب الفولتية الزائدة . ان الاسباب الرئيسية لهبوط الفولتية على طـــول الخطوط هي ممانعة الخط نفسه وكذلك الحمل ذو عامل القدرة المتأخر (هذا الاخير هو نتيجة لتيارات المغنطة المأخوذة بوساطة الحمل) .

يمكن تقليل مقاومة الخط بنصب خط اكثر ثقلا ولـكن هذا يضيف الى الـكلفة بحيث يكون هناك حد اقتصادي لهذه الطريقة التي تقلل من هبوط الفولتية . ان مفاعلة التوالي للخط تتناسب مع المحاثة الذاتية للموصل والتي تقل كلما قل التباعد بيـــــن الموصلات نفسها (انظر الفصل 2) . ويجب ان يكون اقل تباعد ممكن بين الموصلات

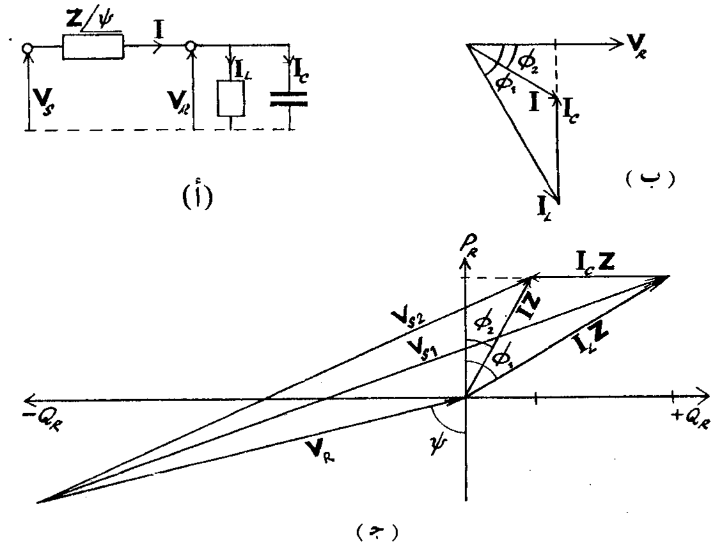
بحيث يمنع حصول الشرر العرضي (flashover) بينها عندما تتأرجح (تتراقص) خلال ظروف طقسية رديئة .

يشجع المستهلـكون على رفع عوامل القدرة المتاخرة في منشآتهم بحيث تقـارب قيمة الواحد وذلك بحساب استهلاكهم على تعريفه عالية لعامل القدرة الواطيء (وتكون عادة بقياس الـ kVA للطلب الاعظم) . اما كلفة نصب اجهزة تحسين عامل القدرة وصيانتها فتتعادل مقابل التخفيض في احتساب الطاقة الـكهربائية المصروفة . على الطالب ان يكون قادرا على بيان انه اذا كان طلب حمل مستهلك P كيلـواط وقـام برفع عامل قدرته من $\cos \phi_1$ الى $\cos \phi_2$ فان قيمة $\cos \phi_2$ الاكثر اقتصادية تحتسب من $\sin \phi_2 = a/b$ ، حيث ان a هي الـكلفة السنوية لـكل kVAr من اجهزة تحسين عامل القدرة المنصوبة (وتشمل الربح والاندثار واجور الصيانة) ، اما b فهـي الانفاق السنوي لـكل kVA من الطلب الاقصى للحمل .

التيار المأخوذ بوساطة معدات تحسين القدرة هو الفرق بين مركبة التيار الاصليـة والمركبة المتفاعلة الجديدة (انظر الشكل 1.8) . اما فولتية نهاية الارسال قبل نصـب معدات تحسين عامل القدرة وبعدها فهي V_{S1} و V_{S2} على التعاقب .

تعد المتسعات الستاتيكية المربوطة على التوازي مع الحمل (ربطا نجمياً او مثلثيا) طريقة طبيعية لتحسين عامل قدرة الحمل الـكلي . ان متسعة ما تعد مصباً لـ vars المتقدمة وعليه تكون مصدراً لـ vars المتأخرة (انظر الملحق 4) التي تجهز الى الحمل وبذلك تقلل الـ vars المتأخرة المأخوذة من المصدر . وتسيطر المرحلات الحساسـة للفولتية ، بالتدريج ، على كمية المتسعة في الدائرة وذلك لابقاء V_R ثابتة بالتقريب لقيمة ثابتة من قيم V_S . اذا استخدمت قيمة ثابتة للمتسعة فينبغي ان يلاحظ من الشكل 1.8 (ج) انه في حالة حمل خفيف قد ترتفع V_R الى قيمة عالية ($V_R > V_S$) .

اما لحمل محركات صناعية كبير ، فان تحسين عامل القدرة الـكلـي يمكن ان ينفذ باستخدام محركات تزامنية بوصفها جزءاً من الاجهزة المنصوبة (انظر الفصل 7) . وعندما تكون اثارة هذه المحركات مفرطة فانها تتصرف بوصفها متسعات اذ تأخذ تياراً من المصدر بعامل قدرة متقدم . حيث يكون من السهولة بمكان الحصول على سيطرة دقيقة على الاثارة . في هذا المضمار يشار الى المحركات التزامنية بالمعوضات التزامنيـة (متسعات تزامنية او معدلات الطور التزامنية) .



الشكل 1.8 : تحسين عامل القدرة

توجد في معظم خطوط النقل محولات ذات مأخذ متغيرة في حالة الحمل وتكون عند طرف واحد من الخط أوعند طرفيه (انظر الفصل 6) . تعطي هذه سيطرة عددية (اوفي الطور نفسه) للفولتية . افرض على سبيل المثال ان قدرة ما يراد نقلها من قضبان توزيع بفولتية 11 ك . ف الى قضبان توزيع ذات 33 ك . ف عبر خط ذي 132 ك . ف له آلية تشغيل مغير – المأخذ على ملفات ال 132 ك . ف . وان كلا قضبان التوزيع يجب ابقاؤها عند فولتياتها المقننة . يمكن رفع لفات الفولتية العالية h.v على محول نهاية الارسال بنسبة 10% بحيث تكون فولتية نهاية الارسال 10% أعلى من قيمتها الاسمية . فاذا كان الحمل بمقدار بحيث ان الفولتية عند طرف الحمل من الخط ذي 132 ك . ف تكون 10% اقل من قيمتها الاسمية فعندئذ يمكن تقليل لفات الفولتية العالية في المحول عند نهاية الاستلام بنسبة 10% . وبذلك ستعطي فولت / لفة اسمية وفولتية مقدارها 33 ك . ف . على جهة الفولتية الواطئة l.v . وتعمل آلية تشغيل تغير المأخذ بوساطة مرحل حساس للفولتية يكشف اي تغير في فولتية المنظومة . ويؤخر زمن اشتغال المرحل لمنعه من التشطط مع اي تغيرات عابرة للفولتية .

1.2.5 السيطرة على الخطوط المتوازية والخطوط الحلقية : السيطرة على المنظومة الكبرى

CONTROL OF PARALLEL LINES AND RINGS: CONTROL OF THE GRID SYSTEM

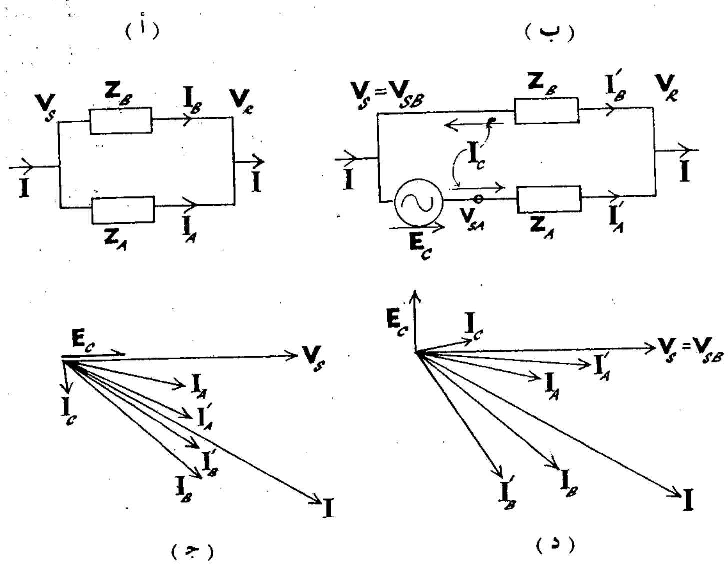
يبين الشكل 1.9 (أ) خطين قصيرين مربوطين على التوازي . من الواضح ان

$$I_A Z_A = I_B Z_B$$

وكذلك يكون

$$I_A = IZ_B/(Z_A+Z_B). \qquad [1.20]$$

واقتسام تيار الحمل الكلي سعةً وطوراً بين الخطين يمكن اختياره في مرحلة التصميم باختيار ملائم للمانعتين Z_A و Z_B . أو بعد النصب باضافة مفاعلة الى خط واحد . واذا امتلكت كل من Z_A و Z_B نسبة X/R متساوية فان جميع التيارات الثلاثية سوف تكون في طور واحد ، وهذه تعطي الاستخدام الاقتصادي الامثل لسعة تحميل الموصل .



الشكل 1.9 خطوط قصيرة على التوازي

تأمل الان المسألة التالية . افرض انه في الشكل 1.9 (b) قد اعطيت جميع قيم I, I'_A, I'_B, Z_A , وكذلك V_R (اي اقتسام حمل معين معلوم مسبقا بين خطوط معينة) . عليه فان V_{SA} و V_{SB} اللذين يمثلان فولتيتي نهاية الارسال للخطين A و B تكونان ثابتتين وغير متساويتين (بصورة عامة) . لذلك انه من الضروري التغلب على الفرق بينهما بوساطة ق . د . ك معززة $E_C = V_{SA} - V_{SB}$ عليه فان اي ممانعة ضمن المعزز تعامل بوصفها جزءاً من Z_A نفسها) . الطريقة السهلة لحل مثل هذه المسألة هي ان يُفرض ان I_A و I_B معلومتا القيمة بالاقتسام الطبيعي بوساطة الخطين (الشكل 1.9 والمعادلة [1.20]) ويضاف لـكليهما التيار

$$I_C = E_C/(Z_A + Z_B) \qquad [1.21]$$

الذي يدور حول الخطين (ولايمكنه الدوران في الحمل كذلك لـكون تيار الحمـــل ثابتا) . عليه فالتيار الحقيقي في الخط A يكون $I'_A = I_A + I_C$ بينما يكون التيار في الخط B هو $I'_B = I_B - I_C$ (يسري من نهاية الارسال الى نهاية الاستلام) .

المعزز هو عبارة عن مصدر للفولت أمبيرات ويتكون عادة من زوج من المحولات يتغذى ابتدائياهما من قضبان التوزيع لنهاية الارسال (افرض انها موضوعة عند جهة نهايـــة الارسال) بفولتية V_{SB} . ويكون احد هذين المحولين عادة ذا مأخذ متغير اعتيادي والذي يعطي ق . د . ك معززة منطبقةً الطور مع V_{SB} بينما يعطي المحول الاخر وهو المحول التعامدي ق . د . ك معززة عمودية مع V_{SB} .

يوضح الشكل 1.9 (جـ) ق . د . ك E_C معززة منطبقة الطور وتيارا دوارا I_C يتأخر عنها بزاوية قدرها 90° تقريبا (هذا معناه ان الخط له نسبة X/R عاليـــة) . وتاثير ذلك هو جعل التيارين I_A و I_B في الطور نفسه تقريبا . ويعني هذا ان I'_A و I'_B لهما الطور نفسه كذلك . من الواضح ان تعزيز توحيد الطور هذا له تاثير ملحوظ على توزيع الـ var بين الخطين وخاصة عند قيم عالية للنسبة X/R . القدرة المتفاعلة المتأخرة vars تؤخذ من الخط B وتحقن في الخط A .

يوضح الشكل 1.9 (د) ق . د . ك معززة تتقدم على V_{SB} بزاوية قدرها °90 ، ويوضح ايضا ان التعزيز العمودي له تاثير ملحوظ على توزيع القدرة بين الخطوط حيث انتقلت القدرة من الخط B الى الخط A . يعتمد عمل المحول التعامدي على حقيقة انه في منظومة متوازنة ثلاثية الطور تكون V_{RN} و V_{YB} متعامدة وبوساطة محول عزل له مأخذ متغير في حالة الحمل ومبدل ارجاع عتلي فان نسبة من V_{YB} يتم حقنها في الخط الاحمر لتضاف الى V_{RN} : والشيء نفسه ينطبق على الخطين الاخرين . تدعى هذه الاجهزة اعتياديا بالمعززات التعامدية وذلك لكون ان تقنينها معادل للفولت أمبيرات المعززة للخط $(E_C I'_A)$ فقط . تستخدم الشبكة الكبرة في بريطانيا بعضا من هذه المعززات التعامدية : وقد تستخدم ايضا لدفع القدرة على طول خط له ممانعة عالية (نسبة الى المسارات المتوازية البديلة) .

اذا افترض ان كافة المستهلكين يجهزون بفولتية وتردد ثابتين خلال فترة قصيرة من الزمن ، فيكون الطلب على الحمل للقدرة والقدرة المتفاعلة ثابتا في المقدار والموقع . وبالسيطرة على القدرة الميكانيكية والاثارة لطواقم المنوبات جميعها يتحدد توليد القدرة والقدرة المتفاعلة بالمقدار والموقع. ان شبكة النقل الكبرى هي حلقة الوصل بين التوليد والحمل المطلوب . من واجب مهندسي السيطرة اعطاء اوامرهم لتنظيم تجهيز القدرة (الـ[illegible]) وكذلك تنظيم اثارة المنوبات ومأخذ المحولات بحيث يكفي التوليد حاجة الحمل . (بضمنها المفقودات) باقل كلفة تشغيل ممكنة وبدون تجاوز تحميل اي جهاز تعريض امينة المنظومة او استقراريتها للخطر حيث انه قد تمت الاشارة مسبقا الى ان اي تغاير بين التجهيز والاحتياج سيؤدي الى تغير في فولتية المنظومة والتردد او احدهما حتى يتساوى التجهيز مع الطلب .

1.3 الخطوط الطويلة Long Lines

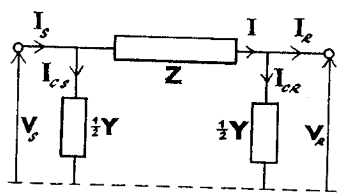
ان تمثيل الخطوط القصيرة للنقل يهمل دوائر مقاومة ومتسعة التوازي التي تم شرحها في الفقرة 1.1 (ويعامل اجهزة تحسين عامل القدرة بوصفها جزءا من الحمل) . اما تمثيل خطوط النقل الطويلة فيأخذ بنظر الاعتبار دوائر التوازي هذه والتي يعبر عنها باحتوائها على مسامحة (بدلا من ممانعة) وذلك لتناسب هذه مع طول المسار وعليه يمكن اعطاؤها بالسيمنس / كيلو متر .

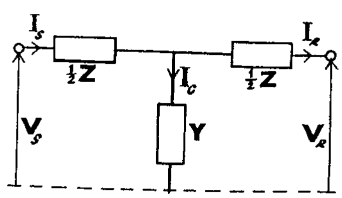
1.3.1 دوائر π و T الاسمية   NOMINAL Π AND T CIRCUITS

في الدوائر الاسمية توضع مسامحات التوازي في نقاط معينة على الخط وذلك لتمييزها عن توزيعها بصورة منتظمة على طول الخط كما يحدث عمليا . في صيغـــة Π (pi) الاسمية توضع نصف المسامحة بين النهايتين كما هو موضح في الشكـــل 1.10 (أ) . في صيغة T (tee) الاسمية ، تركز المسامحة في منتصف الخط بينما يتم تجزئة الممانعة الى قسمين متساويين كما هو مبين في الشكل 1.10 (ب) . ومؤهلات (الاسمية) هذه تدل على ان هذه القرارات تكون كيفية ولـكنها مفيدة وتعطي دقة كافية لـكثير من الاغراض العملية .

ان التاثير الرئيسي لتفرع التوازي هو متسعة الخط (انظر الفصل 3)، وهذه المتسعة سوف تاخذ تيارا يتقدم بزاوية 90° على الفولتية المسلطة عليه . يمكن عمل سماح لاي فقد في القدرة في تفرعات التوازي للخط بسبب التسرب على سطوح العوازل تحت الظروف الرديئة للطقس وقدرة الهالة المفقودة في الجو (انظر الفصل 3) حيث يمكن ضمهما معا ويعاملان على انهما مقاومة توازٍ لها توصيلية G تساوي معكوس مقاومـــة التوازي. لذا فان مسامحة دائرة التوازي المتفرعة تعطى كالاتي

$$\mathbf{Y} = G + \mathrm{j}\,2\pi f C$$





الشكل 1.10 (أ) Π – الاسمية . (ب) T – الاسمية

ويعطى تيار التوازي المناظر كالاتي

$$\mathbf{I} = \mathbf{V}\mathbf{Y} = \mathbf{V}G + \mathrm{j}\,\mathbf{V}2\pi f C.$$

ويكون تيار التوازي (الفرع) مساوياً لمجموع تيارين احدهما بالطور نفسه مع الفولتية والاخر يسبقها بزاوية $90°$. واذا ما اهمل التسرب وظاهرة الهالة فان مقاومة التوازي تكون قيمتها مالانهاية وعليه $G = 0$. اما المتسعة C فهي المتسعة الى المحايد / طور وتحتسب من الابعاد الفيزياوية للخط (انظر الفصل 3) عليه تكون دائرة التوازي هي دائرة نجمية مكافئة باستخدام قيم خط الى محايد .

اذا رسم الان المخطط الطوري لخط ممثل بصيغة Π الاسمية ، فسوف يتضح ان تاثير متسعة التوازي في نهاية حمل الخط تعطي صيغة من صيغ تحسين عامل القدرة حيث انه يقلل $\mathbf{V}_S$ عن قيمة معلومة من $\mathbf{V}_R$ اذا ماقورن بالخط القصير المماثل له . اما ممانعة التوالي للخط فتكون .

$$\mathbf{Z} = R + \mathrm{j}\,X = R + \mathrm{j}\,2\pi f L = Z/\psi\ \Omega/\text{phase}.$$

حيث R هي مقاومة الموصل وتستخرج عادة من جداول خاصة تاخذ بنظر الاعتبار تاثيرات درجة حرارة التشغيل والجدل وتاثير القشرة للموصل عند تردد 50 هرتز، اما L فهي المحاثة / الطور وتحتسب من الابعاد الفيزياوية للخط (انظر الفصل 2) . من الاهمية بمكان ملاحظة ان معادلات الفولتية والتيار المراد اشتقاقها للخطوط الاسمية تطبق فقط للقيم في اطراف الخط ولاتعطي اي دلالة لقيم اخرى عند اي نقطة على طول الخط نفسه .

اما دائرة Π الاسمية (الشكل 1.10 (أ)) فسوف تحلل الان بفرض ان $\mathbf{V}_R$ و $\mathbf{I}_R$ معلومتان .

$$\begin{aligned}
\mathbf{I}_{CR} &= \mathbf{V}_R\mathbf{Y}/2 \\
\mathbf{I} &= \mathbf{I}_R + \mathbf{I}_{CR} \\
\mathbf{V}_S &= \mathbf{V}_R + \mathbf{IZ} \\
&= \mathbf{V}_R + (\mathbf{I}_R + \mathbf{V}_R\mathbf{Y}/2)\mathbf{Z} \\
&= (1 + \mathbf{YZ}/2)\mathbf{V}_R + \mathbf{ZI}_R \qquad [\text{أ}1.22] \\
\mathbf{I}_{CS} &= \mathbf{V}_S\mathbf{Y}/2 \\
\mathbf{I}_S &= \mathbf{I} + \mathbf{I}_{CS} \\
&= \mathbf{I}_R + \mathbf{V}_R\mathbf{Y}/2 + (1 + \mathbf{YZ}/2)\mathbf{V}_R\mathbf{Y}/2 + \mathbf{ZI}_R\mathbf{Y}/2 \\
&= \mathbf{Y}(1 + \mathbf{YZ}/4)\mathbf{V}_R + (1 + \mathbf{YZ}/2)\mathbf{I}_R. \qquad [\text{ب}1.22]
\end{aligned}$$

على الطالب الان ان يحلل دائرة T الاسمية (الشكل 1.10 (ب))ويبين ان

$$\mathbf{V}_S = (1+\mathbf{YZ}/2)\mathbf{V}_R + \mathbf{Z}(1+\mathbf{YZ}/4)\mathbf{I}_R \qquad [1.23\text{أ}]$$

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{YV}_R + (1+\mathbf{YZ}/2)\mathbf{I}_R. \qquad [1.23\text{ب}]$$

يمكن الحصول على بعض الانطباعات عن الاهمية العددية للمعادلات اعلاه من خلال ادخال قيم نموذجية لخطوط قدرة ذات 50 هرتز . فالمحاثة لخط ما تكون حوالي 1·25 ملي هنري / كم وتعطي هذه مفاعلة قيمتها حوالي 0·4 أوم / كم بينما تكون زاوية الممانعة بحدود $70°\ (X/R \simeq 3)$ وعليه تكون $Z \simeq 0{\cdot}42\angle$ أوم / كم . والمتسعة لخط ما تكون حوالي الى المحايد / كم وتعطي هذه مسامحة $Y \simeq 3$ مايكروسيمنس / كم . اما التسرب والهالة فيهملان عادة وعليه تكون زاوية الطور للمسامحة Y هي $+90°$ وعليه فلخط طول مساره 100 كم $\mathbf{YZ} \simeq 0{\cdot}013\angle 160°$ برسم مجموع المتجهات لنصف قيمة YZ او ربعها سوف يبين ان $(1+\mathbf{YZ}/2)$ وكذلك $(1+\mathbf{YZ}/4)$ / كليهما يكونان اقل بقليل من 1 عددياً ، وبزاوية طور صغيرة جداً وموجبة .

ان دوائر π و T الاسمية لاتكون متكافئة ولامكافئة للخط الحقيقي : وانما هي تقريبات مختلفة لخط حقيقي معين . عليه فان تحويل الربط النجمي الى مثلثي (انظر الملحق 2) لايمكن استخدامه لغرض اشتقاق دائرة من الاخرى . والتمثيلات المضبوطة لخط طويل متجانس في صيغة Π او T تدعى بصيغ Π و T المكافئة (انظر الفقرة 1.3.4) .

لقد تم في الفقرة 1.2.1 تعريف « هبوط الفولتية » وكذلك « انتظام الفولتية المتلازم » وبين ان هاتين القيمتين تكونان متساويتين في خط قصير . لكن هذه المساواة لاتطبق في حالة الخطوط الطويلة لان الفولتية عند نهاية الحمل للخط لاتبقى مساوية لفولتية نهاية الارسال في ظروف اللاحمل . اما الفرق بينهما فيكون بسبب تيار شحن الخط الذي يسري في ممانعة التوالي للخط نفسه . هذه النقطة تمت مناقشتها في الفقرة 1.2.4 بالاشارة الى تحسين عامل القدرة (انظر الشكل 1.8) . اما ازدياد الفولتية من نهاية الارسال باتجاه نهاية الحمل تحت ظروف اللاحمل (تاثير فرنتي Ferranti) ، فتظهر بوضوح في حالة الخطوط الطويلة جدا ذات الفولتية العالية (انظر الفقرة 1.3.2)

مع ان الخطوط الاسمية تكمن اهميتها الرئيسية في النواحي الاكاديمية ففي اغلب الاحيان تستخدم صيغة Π الاسمية لتمثيل الخطوط الطويلة خلال تحليل المنظومة باستخدام الحاسبات الالــكترونية .

1.3.2 الخط الطويل المتجانس UNIFORM LONG LINE

في تمثيلات Π و T الاسمية لخط نقل معين . كانت المعالم الثابتة من مقاومة ومحاثة وكذلك متسعة متضامة او مجتمعة في نقاط معينة على طول الخط . اما في التحليلات التالية فستكون هذه المعالم مفروضة على اساس انها موزعــــة بانتظام على طول الخــط الــكلي . وعليه تعطى قيمها عادة لــكل كيلومتر طول . وكما في التمثيلات الاسمية للخط فتحتسب قيم الممانعة والمتسعة مرة اخرى من الابعاد الفيزياوية للخط باستخدام المعادلات المعطاة في الفصلين 2 و 3

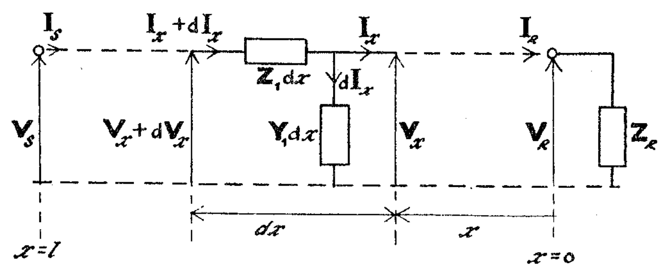
يستخدم تمثيل الخط المتجانس للخطوط الطويلة جدا ذات الفولتية العالية كونها تعطي تمثيلا مضبوطا اكثر صحة من صيغة المعالم المتضامة لــكن يجب ان يلاحظ انه بسبب التدلي الحاصل بين الابراج (انظر الفصل 4) يكون هناك بعض الشك في صحة هذا التمثيل من حيث طول الخط وارتفاعه عن الارض اللذان يؤثران على حساب المحاثة والمتسعة . ان التحليل الرياضي سوف يعطي استجابة الخط في الحالة المستقرة عند تسليط فولتية جيبية ذات تردد ثابت مقداره f

في هذه الفقرة سوف يشير الرمز السفلي l الى قيمة معينة لــكل كيلومتر وعلى سبيل المثال تكون Y_1 و Z_1 مسامحة التفرع بالسيمنس / كم وممانعة التوازي بالاوم / كم على التعاقب. ولايشير الرمز السفلي 1 الى قيم التتابع الموجب (المذكورة في الفصل 8) على الرغم من ان هذا الفصل يتعامل مع الحالات المتوازنة فقط اي حــالات التتابــع الموجب . عليه تكون **Y** و **Z** هي القيم المقابلة لمجموع المسامحات والممانعات للخط . اي ان $\mathbf{Y} = \mathbf{Y}_1 l$ وكذلك $\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 l$

يوضح الشكل 1.11 خطا متجانسا معينا لمقطع قصير جدا dx على مسافة x من نهاية الاستلام تكون ممانعة التوالي للخط هي $\mathbf{Z}_1\, dx$ حيث ان $\mathbf{Z}_1 = R_1 + j\,2\pi f L_1$

وتكون مسامحة التفرع له هي $Y_1\,dx$ حيث ان $Y_1 = G_1 + j\,2\pi f C_1$. يكون الهبوط بالفولتية في المقطع (من اليسار الى اليمين) هو

$$(\mathbf{V}_x + d\mathbf{V}_x) - \mathbf{V}_x = d\mathbf{V}_x = (\mathbf{I}_x + d\mathbf{I}_x)\mathbf{Z}_1\,dx \simeq \mathbf{I}_x\mathbf{Z}_1\,dx$$



الشكل 1.11 خط طويل متجانس

وعند اهمال الحدود ذات الدرجة الثانية . وبالاسلوب نفسه

$$d\mathbf{I}_x \simeq \mathbf{V}_x\mathbf{Y}_1\,dx.$$

وعليه فان

$$\frac{d\mathbf{V}_x}{dx} = \mathbf{Z}_1\mathbf{I}_x, \qquad [1.24\text{أ}]$$

$$\frac{d\mathbf{I}_x}{dx} = \mathbf{Y}_1\mathbf{V}_x. \qquad [1.24\text{ب}]$$

على الطالب ان يتحقق من ان هذه المعادلات نفسها يتم الحصول عليها لاي تمثيل من تمثيلات الخط ضمن المقطع الصغير المتناهي هذا . اي مع وجود دائرة التفرع الى يسار مقطع التوالي . بمفاضلة معادلة واحدة بالنسبة الى x وبالتعويض من المعادلة الاخرى ينتج

$$\frac{d^2\mathbf{V}_x}{dx^2} = \mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1\mathbf{V}_x. \qquad [1.25\text{أ}]$$

$$\frac{d^2\mathbf{I}_x}{dx^2} = \mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1\mathbf{I}_x. \qquad [1.25\text{ب}]$$

هاتان المعادلتان تفاضليتان قياسيتان واعتياديتان من الدرجة الثانية وذواتا معاملات ثابتة .

من المفيد في هذه المرحلة تقديم بعض التعابير التي سوف تجري مناقشتها بالتفصيل لاحقا (الفقرة 1.3.5) . عليه سنعرف $\gamma = \sqrt{(Y_1Z_1)} = \alpha + j\beta$ ، حيث ان γ هو معامل الانتشار / كم ، α هي معامل التضاؤل بالنيبر / كم اما β فهي معامل تغير الطور بالدرجات النصف قطرية / كم . كذلك سنعرف $Z_c = \sqrt{(Z_1/Y_1)} = \sqrt{(Z/Y)}$ او حيث أن Z_c الممانعة المميزة (وتسمى بممانعة التمور او الممانعة الطبيعية ايضاً) للخط . لاحظ أن Z_c لاتكون معتمدة على طول الخط نفسه (هناك رمز اخر للممانعة Z_c هو Z_o . وسوف لايستخدم الاخير هنا حتى لايحصل ارباك بينه وبين ممانعة التتابع الصفري . انظر الفصل 8 وكذلك المواصفات القياسية البريطانية رقم B.S.1991) .

يمكن كتابة حل المعادلة [1.25 أ] بالصيغة الاسية وكما يلي

$$\mathbf{V}_x = \mathbf{a}\, e^{\gamma x} + \mathbf{b}\, e^{-\gamma x}, \qquad [\text{أ } 1.26]$$

حيث ان a و b هما ثابتا التكامل . بمفاضلة المعادلة [1.26 أ] بالنسبة الى x والتعويض من المعادلة [1.24 أ]نحصل على

$$\mathbf{I}_x = \frac{\mathbf{a}\gamma\, e^{\gamma x} - \mathbf{b}\gamma\, e^{-\gamma x}}{\mathbf{Z}_1},$$
$$= \frac{\mathbf{a}\, e^{\gamma x} - \mathbf{b}\, e^{-\gamma x}}{\mathbf{Z}_c}. \qquad [\text{ب } 1.26]$$

يمكن الحصول على قيم للثابتين a و b وذلك بادخال الشروط الحدودية المعطاة والمعروفة مسبقا من حيث انه لـ $x = 0$ ، $\mathbf{V}_R = \mathbf{V}_x$ وكذلك $\mathbf{I}_x = \mathbf{I}_R$ وعليه فان

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{a} + \mathbf{b}$$
$$\mathbf{I}_R = (\mathbf{a} - \mathbf{b})/\mathbf{Z}_c$$
$$\mathbf{a} = \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R + \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R)$$
$$\mathbf{b} = \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R - \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R).$$

اما الصيغ الرياضية لمعادلات فولتية نهاية الارسال والتيار فيمكن الحصول عليها الان بالتعويض عن $x = l$ في [1.26] وبملاحظة ان

$$e^{\gamma l} = e^{\alpha l + j\beta l} = e^{\alpha l}\, e^{j\beta l}$$
$$= e^{\alpha l}(\cos \beta l + j \sin \beta l)$$
$$= e^{\alpha l}\underline{/\beta l}.$$

$$\mathbf{V}_S = \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R + \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R)e^{\gamma l} + \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R - \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R)e^{-\gamma l}$$
$$= \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R + \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R)e^{\alpha l}\underline{/\beta l} + \tfrac{1}{2}(\mathbf{V}_R - \mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R)e^{-\alpha l}\underline{/-\beta l} \qquad [\text{أ } 1.27]$$

$$\mathbf{I}_S = \tfrac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{V}_R}{\mathbf{Z}_c} + \mathbf{I}_R\right)e^{\gamma l} - \tfrac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{V}_R}{\mathbf{Z}_c} - \mathbf{I}_R\right)e^{-\gamma l}$$
$$= \tfrac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{V}_R}{\mathbf{Z}_c} + \mathbf{I}_R\right)e^{\alpha l}\underline{/\beta l} - \tfrac{1}{2}\left(\frac{\mathbf{V}_R}{\mathbf{Z}_c} - \mathbf{I}_R\right)e^{-\alpha l}\underline{/-\beta l} \qquad [\text{ب } 1.27]$$

لبيان بعض من اهمية هذه المعادلات الرياضية وذلك بافتراض ان ، لخط قدرة طويل ذي فولتية عالية ، $\mathbf{Y}_1 = 3{\cdot}5\underline{/90^\circ}$ ميكروسيمنس / كم (باهمال مفاقيد التسرب والهالة)، وكذلك $\mathbf{Z}_1 = 0{\cdot}039 + j\,0{\cdot}327$ اي $0{\cdot}33\underline{/83{\cdot}2^\circ}$ اوم / كم على الطالب ان يتحقق من ان

$$\gamma \simeq 1{\cdot}08 \times 10^{-3}\underline{/86{\cdot}6^\circ} \text{ per km}$$
$$\alpha \simeq 6{\cdot}2 \times 10^{-5} \text{ nepers/km}$$
$$\beta \simeq 1{\cdot}08 \times 10^{-3} \text{ radians/km} \simeq 0{\cdot}06^\circ/\text{km}$$
$$\mathbf{Z}_c \simeq 306\underline{/-7^\circ} \text{ ohms}$$

، حيث تمثل $\mathbf{Z}_c$ دائرة توالي لها مقاومة وكذلك متسعة كبيرة . باعادة ترتيب [1.27] وبالتعويض بالمقدار التالي

$$\tfrac{1}{2}(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) = \cosh \gamma l$$
$$\tfrac{1}{2}(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) = \sinh \gamma l$$

ينتج

$$\mathbf{V}_S = (\cosh \gamma l)\mathbf{V}_R + (\sinh \gamma l)\mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R \qquad [\text{أ } 1.28]$$

$$\mathbf{I}_S = \left(\frac{\sinh \gamma l}{\mathbf{Z}_c}\right)\mathbf{V}_R + (\cosh \gamma l)\mathbf{I}_R. \qquad [\text{ب } 1.28]$$

تكون المعادلتان [1.28a أ] و [1.28b ب] مفيدتين اذا تيسرت جداول للدوال الطبيعية المركبة . والا يمكن استخدام العلاقات الرياضية التالية

$$\sinh \gamma l = \sinh \alpha l \cos \beta l + \mathrm{j} \cosh \alpha l \sin \beta l \qquad [\text{جـ } 1.28]$$

$$\cosh \gamma l = \cosh \alpha l \cos \beta l + \mathrm{j} \sinh \alpha l \sin \beta l. \qquad [\text{د } 1.28]$$

وبالتعويض عن كل من γl و $\mathbf{Z}_c$ بدلالة $\mathbf{Y}$ و $\mathbf{Z}$ ، مسامحة التفرع الكلية وممانعة التوالي للخط باكمله ، نحصل على

$$\mathbf{V}_S = (\cosh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{V}_R + \sqrt{(\mathbf{Z}/\mathbf{Y})}(\sinh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{I}_R \qquad [\text{أ } 1.29]$$

$$\mathbf{I}_S = \sqrt{(\mathbf{Y}/\mathbf{Z})}(\sinh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{V}_R + (\cosh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{I}_R \qquad [\text{ب } 1.29]$$

او باسلوب آخر

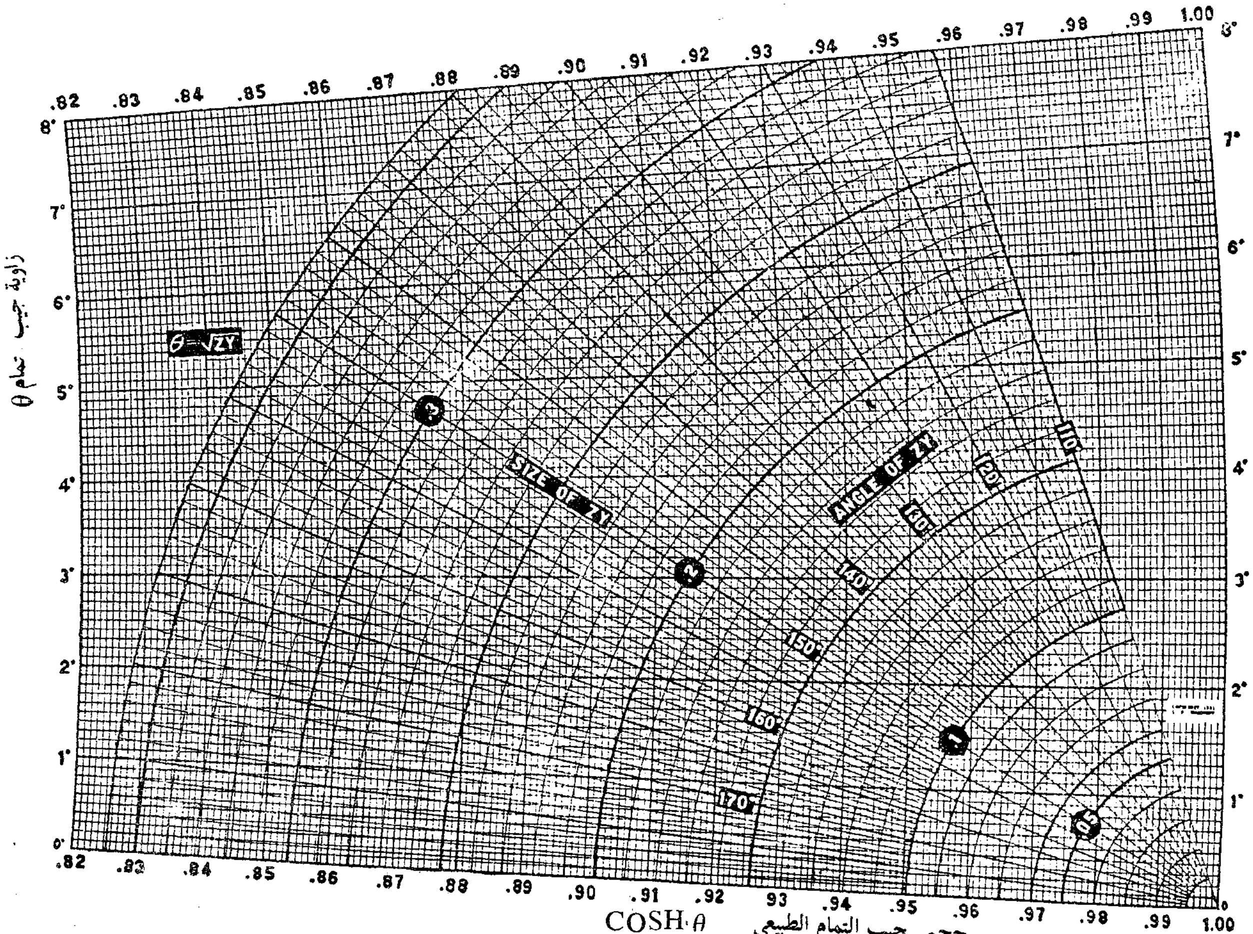
$$\mathbf{V}_S = (\cosh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{V}_R + \left(\frac{\sinh \sqrt{(\mathbf{YZ})}}{\sqrt{(\mathbf{YZ})}}\right)\mathbf{Z}\mathbf{I}_R \qquad [\text{جـ } 1.29]$$

$$\mathbf{I}_S = \left(\frac{\sinh \sqrt{(\mathbf{YZ})}}{\sqrt{(\mathbf{YZ})}}\right)\mathbf{Y}\mathbf{V}_R + (\cosh \sqrt{(\mathbf{YZ})})\mathbf{I}_R \qquad [\text{د } 1.29]$$

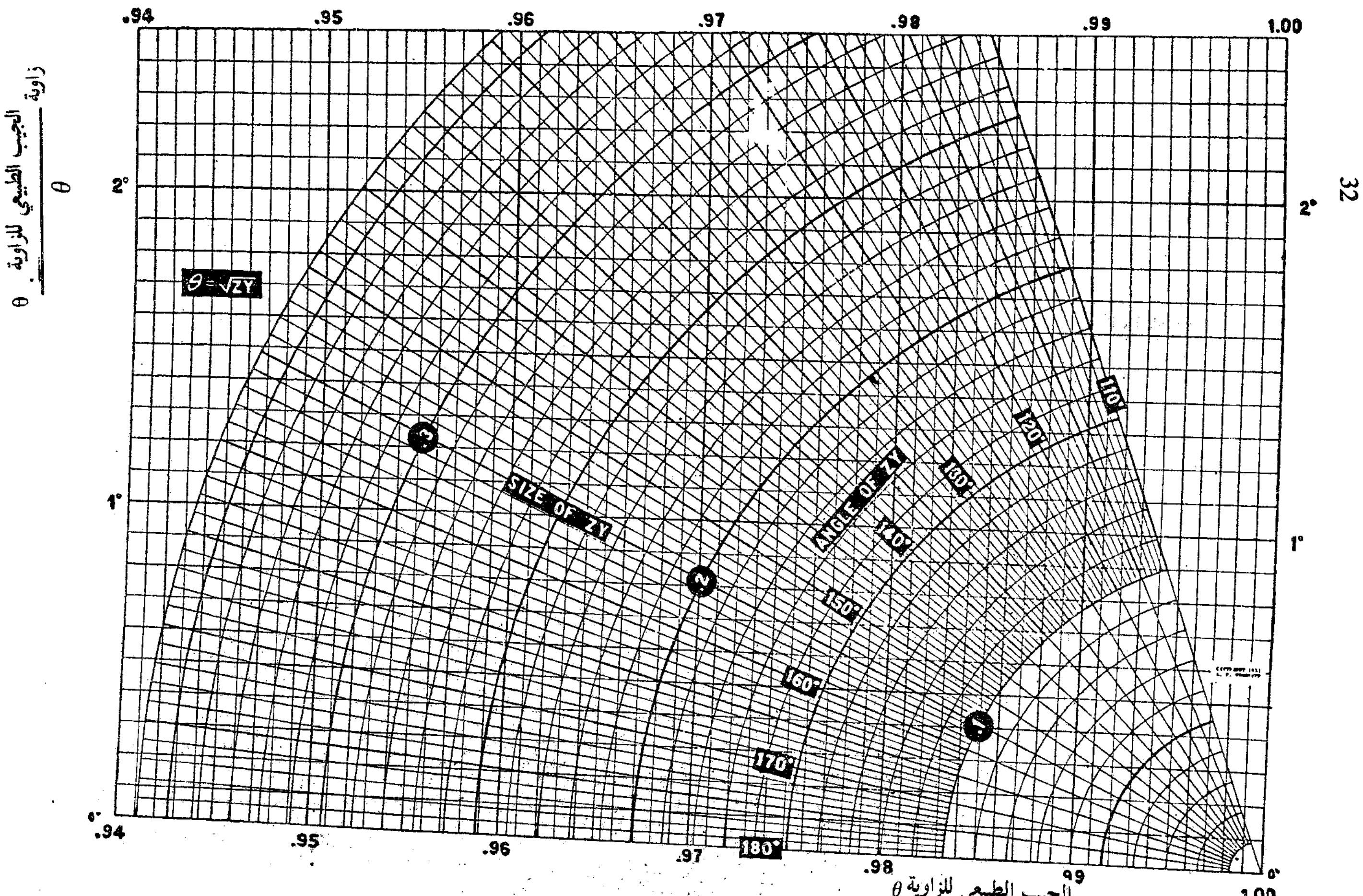
من مزايا المعادلتين [1.29 جـ] و [1.29 د] امكانية احتساب العوامل المحصورة بين الاقواس مباشرة باستخدام مخططات وودرف Woodruff (انظر المخططات 3.2.1 في الفقرة 1.3.2) . وكذلك يمكن ان تفك بوصفها متوالية لانهائية متقاربة . وذلك لان $\sqrt{(\mathbf{YZ})}$ يكون عدديا صغيراً جداً . وكالاتي

$$\cosh \sqrt{(\mathbf{YZ})} = 1 + \frac{\mathbf{YZ}}{2!} + \frac{(\mathbf{YZ})^2}{4!} + \frac{(\mathbf{YZ})^3}{6!} + \ldots \qquad [\text{أ } 1.30]$$

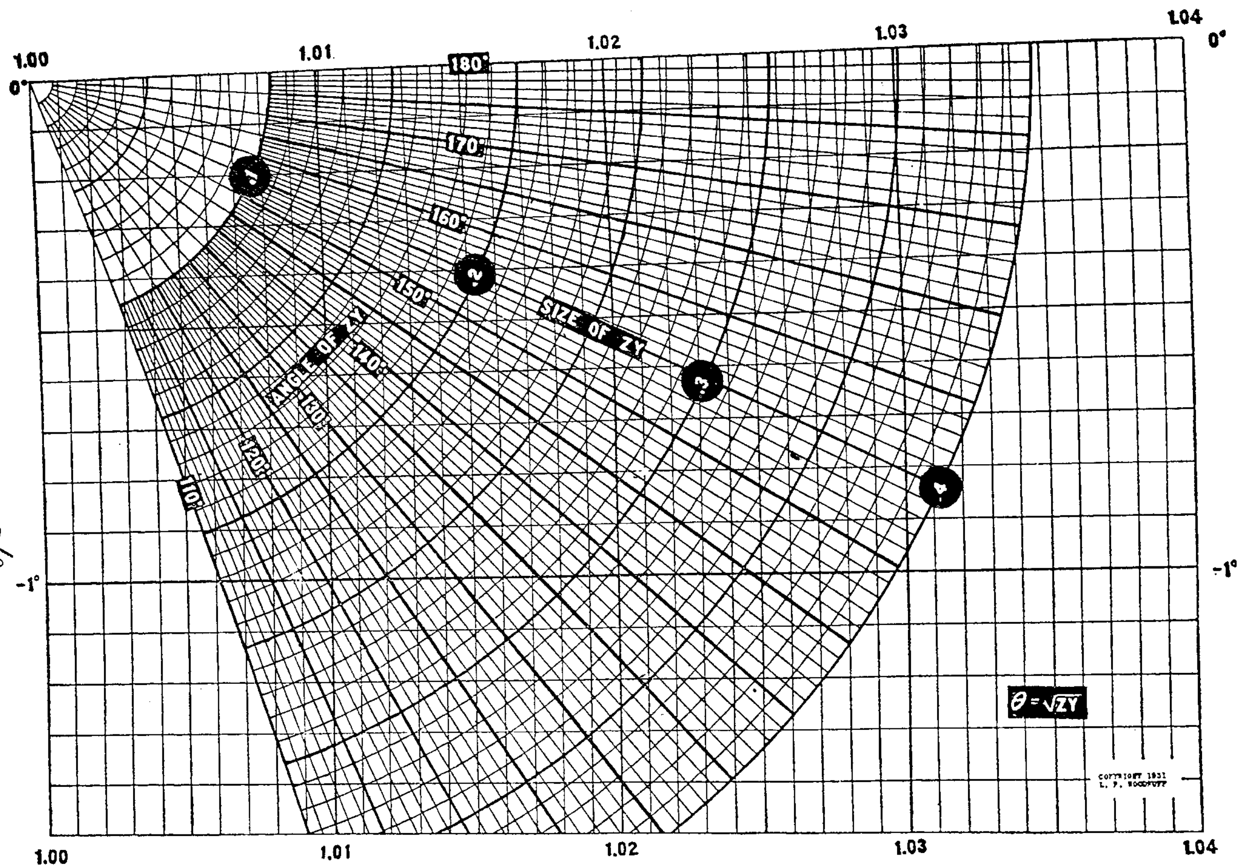
$$\frac{\sinh \sqrt{(\mathbf{YZ})}}{\sqrt{(\mathbf{YZ})}} = 1 + \frac{\mathbf{YZ}}{3!} + \frac{(\mathbf{YZ})^2}{5!} + \frac{(\mathbf{YZ})^3}{7!} + \ldots \qquad [\text{ب } 1.30]$$



مخطط ٤١. الجيب التمام الطبيعي للزاوية θ . استنسخ بموافقة وود روف (Woodruff) لنقل القـــدرة الكهربائية الناشر مؤسسة جون وايلي واولاده 1952 .



مخطط 2 — حجم الجيب الطبيعي للزاوية θ / θ — استنسخ بموافقة وود روف لنقل القدرة الكهربائية الناشر مؤسسة جون وايلي واولاده 1952



زاوية $\frac{\text{الظل الطبيعي للزاوية } \theta/2}{\theta/2}$

حجم $\frac{\text{الظل الطبيعي للزاوية } \theta/2}{\theta/2}$

مخطط 3 الظل الطبيعي للزاوية $\frac{\theta/2}{\theta/2}$ استنسخ بموافقة وودروف (Woodruff) لنقل القدرة الكهربائية

مؤسسة جون وايلي واولاده 1952

تعطـي المعادلات [1.27] و [1.28] وكذلك [1.29] فولتية نهاية الارسال والتيار بدلالة فولتية وتيار نهاية الاستلام . من الواضح ايضاً ان هـــذه المعادلات يمكن ان تعطـي الفولتية $\mathbf{V}_x$ والتيار $\mathbf{I}_x$ عند اي نقطة x من نهايـــة الاستلام اذا ما تم تعويض l بـ x أو اذا ما عبر من $\mathbf{Y}$. $\mathbf{Z}$ بمسامحة التفرع وممانعـــة التوالـي على التعاقب للطول x من الخط . عليه فان معادلات الخط الطويـــــل المتجانس يمكن ان تبنـي الظروف في اي نقطة على طول الخط على خلاف التمثيلات الاخرى التي تنطبق فقط عن اطراف الخط .

يمكن كتابة المعادلات [1.29] وكذلك [1.28] بالصيغة العـامة وكما يلي

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{AV}_R + \mathbf{BI}_R \qquad [\text{أ}\ 1.31]$$

$$\mathbf{I}_S = \mathbf{CV}_R + \mathbf{DI}_R \qquad [\text{ب}\ 1.31]$$

(انظر الفقرة 1.4) . بتطبيق المعادلات العامة هذه على تمثيلات الخطوط التي تمت مناقشتها لحد الان نحصل على الجدول 1.1 (الذي تكون فيه $\mathbf{Y}_c = 1/\mathbf{Z}_c$) . ان صيغ المعادلات المتوالية اللانهائية تبين بوضوح الاخطاء الناتجة من استخدام التمثيل القصـي والاسمـي للخط . بفك المتوالية بدلالة طول الخط l يبين ان تقاربها يكون بطيئاً في حالة الخطوط الطويلة جداً وتكون الاخطاء في استعمال التمثيل القصير والاسمـي كبيرة نسبياً .

يمكن للمعادلة [1.31] ان تقلب لتعطـي ظروف نهاية الاستلام بدلالة ظروف نهائية الارسال وكالاتـــي

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{DV}_S - \mathbf{BI}_S \qquad [\text{أ}\ 1.32]$$

$$\mathbf{I}_R = -\mathbf{CV}_S + \mathbf{AI}_S \qquad [\text{ب}\ 1.32]$$

وبرهان هذه يستخدم حقيقة أنه للخط الهامد $\mathbf{AD} - \mathbf{BC} = 1$ (انظر الفقرة 1.4.2)

الجدول 1.1. معادلات خط النقل

خط قصير	
$\mathbf{A} = 1$	$\mathbf{B} = \mathbf{Z}$
$\mathbf{C} = 0$	$\mathbf{D} = \mathbf{A}$
خط Π اسمي	
$\mathbf{A} = 1 + \frac{\mathbf{YZ}}{2}$	$\mathbf{B} = \mathbf{Z}$
$\mathbf{C} = \mathbf{Y}\left(1 + \frac{\mathbf{YZ}}{4}\right)$	$\mathbf{D} = \mathbf{A}$
خط T اسمي	
$\mathbf{A} = 1 + \frac{\mathbf{YZ}}{2}$	$\mathbf{B} = \mathbf{Z}\left(1 + \frac{\mathbf{YZ}}{4}\right)$
$\mathbf{C} = \mathbf{Y}$	$\mathbf{D} = \mathbf{A}$
خط طويل متجانس	
$\mathbf{A} = \cosh \gamma l$	$\mathbf{B} = \mathbf{Z}_c \sinh \gamma l$
$= \cosh \sqrt{\mathbf{YZ}}$	$= \mathbf{Z}\left(\frac{\sinh \sqrt{\mathbf{YZ}}}{\sqrt{\mathbf{YZ}}}\right)$
$= 1 + \frac{\mathbf{YZ}}{2} + \frac{(\mathbf{YZ})^2}{24} + \dots$	$= \mathbf{Z}\left(1 + \frac{\mathbf{YZ}}{6} + \frac{(\mathbf{YZ})^2}{120} + \dots\right)$
$= 1 + \frac{\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1}{2} l^2 + \frac{(\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1)^2}{24} l^4 + \dots$	$= \mathbf{Z}_1\left(l + \frac{\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1}{6} l^3 + \frac{(\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1)^2}{120} l^5 + \dots\right)$
$\mathbf{C} = \mathbf{Y}_c \sinh \gamma l$	$\mathbf{D} = \mathbf{A}$
$= \mathbf{Y}\left(\frac{\sinh \sqrt{\mathbf{YZ}}}{\sqrt{\mathbf{YZ}}}\right)$	
$= \mathbf{Y}\left(1 + \frac{\mathbf{YZ}}{6} + \frac{(\mathbf{YZ})^2}{120} + \dots\right)$	
$= \mathbf{Y}_1\left(l + \frac{\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1}{6} l^3 + \frac{(\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1)^2}{120} l^5 + \dots\right)$	

1.3.3 قياس المعالم MEASUREMENT OF PARAMETERS

اذا كانت ممانعة الحمل هي $\mathbf{Z}_R = \mathbf{V}_R/\mathbf{I}_R$. فممانعة نقطة – السوق (اوالدخل) على الحمل هي

$$\mathbf{Z}_d = \mathbf{V}_s/\mathbf{I}_s = \frac{(\cosh \gamma l)\mathbf{V}_R + (\sinh \gamma l)\mathbf{Z}_c\mathbf{I}_R}{(\sinh \gamma l)(\mathbf{V}_R/\mathbf{Z}_c) + (\cosh \gamma l)\mathbf{I}_R}$$

$$= \mathbf{Z}_c\left(\frac{\mathbf{Z}_R \cosh \gamma l + \mathbf{Z}_c \sinh \gamma l}{\mathbf{Z}_R \sinh \gamma l + \mathbf{Z}_c \cosh \gamma l}\right) \qquad [1.33]$$

حيث أن

$$\gamma l = l\sqrt{(\mathbf{Y}_1\mathbf{Z}_1)} = \sqrt{(\mathbf{YZ})}.$$

ويمكن الحصول على المعالم للخط الطويل المتجانس بطريقة فحصي الدائرة المفتوحة والدائرة القصيرة واللذين يتم اجراؤهما عند احدى نهايتي الخط . من المعادلة [1.33] تكون ممانعة السوق في حالة الدائرة المفتوحة هي

$$\mathbf{Z}_{do} = \mathbf{Z}_c/\tanh \gamma l \qquad [1.34]$$

وتكون في حالة الدائرة القصيرة

$$\mathbf{Z}_{ds} = \mathbf{Z}_c \tanh \gamma l. \qquad [1.35]$$

وبحل هاتين المعادلتين ينتج

$$\mathbf{Z}_c' = (\mathbf{Z}_{ds}\mathbf{Z}_{do})^{\frac{1}{2}} \qquad [1.36]$$

$$\tanh \gamma l = (\mathbf{Z}_{ds}/\mathbf{Z}_{do})^{\frac{1}{2}} \qquad [1.37]$$

ومنها يكون

$$\sinh \gamma l = \{\mathbf{Z}_{ds}/(\mathbf{Z}_{do} - \mathbf{Z}_{ds})\}^{\frac{1}{2}} \qquad [1.38]$$

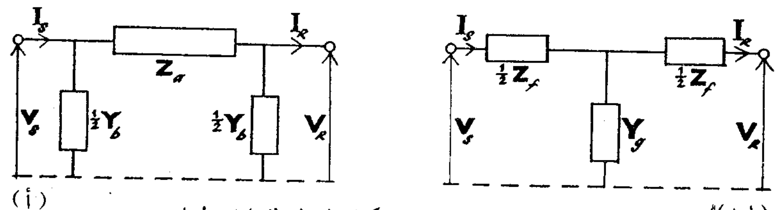
$$\cosh \gamma l = \{\mathbf{Z}_{do}/(\mathbf{Z}_{do} - \mathbf{Z}_{ds})\}^{\frac{1}{2}}. \qquad [1.39]$$

على الطالب الآن ان يعوض $\mathbf{Z}_d = \mathbf{Z}_R$ في المعادلة [[1.33]] وعليه بيان انـــه لتحقيق هذا الشرط يجب ان تكون $\mathbf{Z}_R = \mathbf{Z}_c$. بما ان هذه النتيجة غير معتمدة على طول الخط l . فهي اذن صحيحة لاي طول x . عليه ففي اي نقطة تبعد x على طول خط منته بممانعة تساوي ممانعته المميزة فان النسبة $\mathbf{V}_x/\mathbf{I}_x$ تكون عددا ثابتا يساوي ممانعة الخط المميزة نفسها .

اذا ماتم تعويض الشرط $\mathbf{Z}_R = \mathbf{Z}_c$ في [1.27] فسوف يتبين ان الحد الثاني من هذه المعادلة يؤول الى الصفر(أي أنه لاتوجد أمواج منعكسة للفولتية او للتيار . انظر الفقرة 1.3.6) .

1.3.4 دوائر π و T المكافئة EQUIVALENT Π AND T CIRCUITS

يمكن ان نستبدل بخط طويل متجانس دائرة متضامة للمعالم الثابتة مثل دوائر Π و T المكافئة وذلك كما موضح في الشكل 1.12 ، ويتحقق التكافؤ لتردد واحـد فقط وللظروف الطرفية للخط فقط . باستطاعة الطالب ان يشتق المعادلات المبينة فـي الشكل 1.12 اما بمساواة ممانعات الدائرة المفتوحة وكذلك ممانعات الدائرة القصيرة عند نقطة السوق (الدخل) للخط بالدائرة المكافئة له او بمساواة ثوابت الدوائر هـذه المتمثلة بـ A و B (انظر الفقرة 1.4.4 الجدول 1.2) .



الشكل 1. 12 دوائر Π و T المكافئة لخط طاويل طويل

(أ) دائرة Π المكافئة

$$Z_a = Z_c \sinh \gamma l = Z\left(\frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}}\right)$$

$$Y_b = \frac{2 \tanh (\frac{1}{2}\gamma l)}{Z_c} = Y\left(\frac{\tanh \frac{1}{2}\sqrt{YZ}}{\frac{1}{2}\sqrt{YZ}}\right)$$

(ب) دائرة T المكافئة

$$Z_f = 2Z_c \tanh \tfrac{1}{2}\gamma l = Z\left(\frac{\tanh \frac{1}{2}\sqrt{YZ}}{\frac{1}{2}\sqrt{YZ}}\right)$$

$$Y_g = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c} = Y\left(\frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}}\right)$$

وكلما اصبح الخط اقصر فان ($\sinh \gamma l \to \gamma l$) وكذلك ($\tanh (\gamma l/2) \to \gamma l/2$) وعليـه فان كـل عامل مـن العوامـل المحصورة بيـن الاقـواسـ في الشكل 1.12 ستؤول قيمته الى الواحد . لذلك فأن دائرتي Π و T المكافئتين تؤولان الى دائرتي Π و T الاسميتين حيث ان Y و Z هما مسامحة التفرع وممانعة التوالي الـكليتان على التعاقب للخط المتجانس .

1.3.5 معامل الانتشار : الممانعة المميزة Z_c

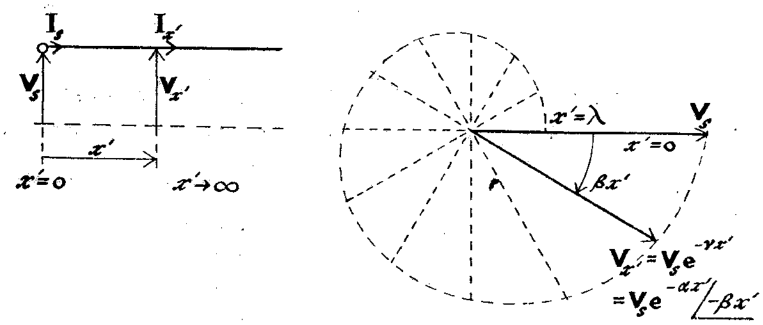
PROPAGATION COEFFICIENT γ: CHARACTERISTIC IMPEDANCE Z_c

يوضح الشكل 1.13 خط نقل متجانسا ذا طول غير محدود حيث تقاس المسافة x' من نهاية الارسال. عليه باستطاعة الطالب ان يبين ان $dV_{x'}/dx' = -Z_1 I_{x'}$ وكذلك $dI_{x'}/dx' = -Y_1 V_{x'}$ و $d^2V_{x'}/dx'^2 = Y_1 Z_1 V_{x'}$ وهذه المعادلة مشابهة لـ [1.25 أ] وعليه يكون الحل مشابها لـ [1.26 أ] وهو

$$V_{x'} = c\, e^{\gamma x'} + d\, e^{-\gamma x'} \qquad [1.40]$$

اذا اقتربت x' من اللانهاية ($x' \to \infty$) ، فان $c\, e^{\gamma x'} \to \infty$ ولهذا تقترب V_x من اللانهاية ايضا ($V_{x'} \to \infty$)، وحيث ان هذا الشرط غير معقول فيزياويا ، يمكن ان تعد $c = 0$. لذا تكون $V_{x'} = d\, e^{-\gamma x'}$. وكذلك اذا ساوت x' صفراً ($x' = 0$) فـأن $V_{x'} = V_S$ لهذا تكون

$$V_{x'} = V_S\, e^{-\gamma x'} = V_S\, e^{-\alpha x'} \underline{/-\beta x'}. \qquad [1.41\ أ]$$



(أ) (ب)

الشكل 1.13 خط لامحدود

وعند ازدياد x' تقل $V_{x'}$ بالمقدار بسبب معامل التضاؤل α وتتأخر كذلك في الطور بسبب معامل تغير الطور β (انظر الشكل 1.13 ب) .

$$I_{x'} = (V_S/Z_c)\, e^{-\gamma x'} = (V_S/Z_c)\, e^{-\alpha x'} \underline{/-\beta x'}. \qquad [1.41\ ب]$$

وتكون ممانعة نقطة – السوق (الدخل) عند اي مسافة x' من نهاية الاستلام كالاتـي

$$Z_d = V_{x'}/I_{x'} = Z_c. \qquad [1.42]$$

عليه تكون نسبة الفولتية الى التيار في اي نقطة على طول الخط ثابتة وتساوي ممانعة الخط المميزة .

تأمل الان نقطتين على الخط متباعدتين بمسافة كيلومتر واحد . فمن المعادلة [1.41 أ] .

$$V_{x'}/V_{(x'+1)} = e^{\gamma}$$

$$\gamma = \log_e (V_{x'}/V_{(x'+1)}). \qquad [\text{أ } 1.43]$$

واذا كانت $V_{x'}$ تسبق $V_{(x'+1)}$ بالطور وبزاوية مقدارها θ درجة نصف قطرية عليه

$$\alpha + j\beta = \log_e [(V_{x'}/V_{(x'+1)})\, e^{j\theta}]$$

$$= \log_e (V_{x'}/V_{(x'+1)}) + j\theta$$

$$\alpha = \log_e (V_{x'}/V_{(x'+1)}) \text{ nepers/km} \qquad [\text{ب } 43]$$

$$\beta = \theta \text{ radians/km} \qquad [\text{ج} 1.43]$$

ان معامل التضاؤل α هو اللوغاريتم الطبيعي للنسبة بين فولتيتين متباعدتين بمسافة كيلومتر واحد على الخط اللامحدود . من الواضح من المعادلة [1.41 ب] ان نسبة الفولتية قد تستبدل بها نسبة التيار المقابلة . في علم المواصلات . يقاس التضاؤل بالديسبل (db) حيث ان نيبر واحد = 8·686 ديسبل وكذلك

$$\alpha = \log_{10}\left(\frac{V_{x'}^2/r}{V_{(x'+1)}^2/r}\right) \text{ bels/km}$$

$$= 20 \log_{10} (V_{x'}/V_{(x'+1)}) \text{ db/km} \qquad [\text{أ} 1.44]$$

$$= 20 \log_{10} (I_{x'}/I_{(x'+1)}) \text{ db/km} \qquad [\text{ب} 1.44]$$

قطعاً . فأن الديسبل يقيس نسبة القدرة والمعادلات اعلاه تفترض عادة ان الفولتيتين المذكورتين (او التيارين) يشتملان على مقاومات متساوية مقدارها r :

اما معامل تغير الطور β فهو التغير الحاصل في زاوية الطور بين فولتيتين (او تيارين) عند نقطتين متباعدتين مسافة كيلومتر واحد على طول الخط .

تبين المعادلة [1.42] ان الخط اللامحدود يمتلك ممانعة نقطة سوق (دخل) مساوية اي ممانعته المميزة . اذا انتهى خط محدود بممانعته المميزة فيمكن التصور بان تلك الممانعة استبدل بها خط لامحدود . لذا فان خطاً محداوداً ينتهـي بممانعته جميع الخواص التي يتميز بها الخط اللامحدود .

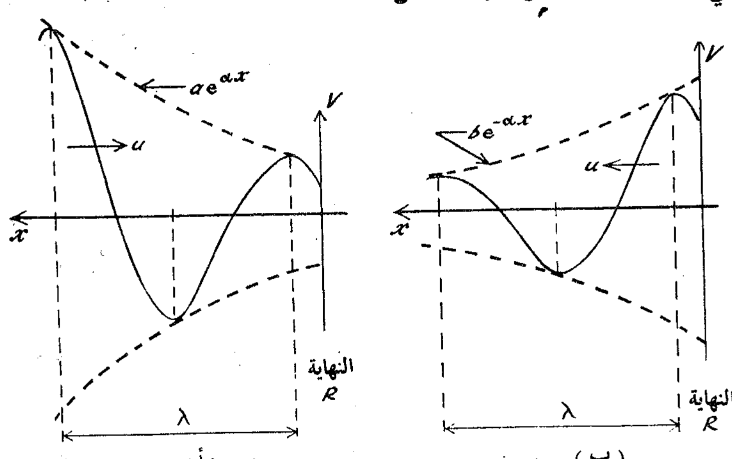
1.3.6 الموجات المنتقلة TRAVELLING WAVES

ان موضوع الموجات المنتقلة عبر خطوط النقل سيتم التطرق اليه بالتفصيل في الجزء الثاني من هذا الـكتاب . في هذه الفقرة سوف نغطي مايكفي لشرح اهمية طول الموجات الـكهرومغناطيسية وسرعة انتشارها على خط معين .

من الواضح في المعادلة [1.27 أ] ان ثوابت التكامل a و b التي تحتويها المعادلة [1.26 أ] هي مطاورات . بفرض ان b يتقدم على a في الطور وبزاوية ϕ هنا نستطيع ان نكتب

$$\mathbf{a} = a \sin \omega t$$
$$\mathbf{b} = b \sin (\omega t + \phi)$$
$$\mathbf{V}_x = a\, e^{\alpha x} \sin (\omega t + \beta x) + b\, e^{-\alpha x} \sin (\omega t - \beta x + \phi) \qquad [1.45]$$

حيث x هي المسافة المقاسة من جهة الحمل للخط .



الشكل 1.14 موجات منتقلة (ليست بالمقياس نفسه)
(أ) موجة ساقطة (ب) موجة منعكسة

اذا اخذنا بنظر الاعتبار اي لحظة ثابتة من الزمن ،ولتكن ، t_1 ، فان الحد الاول على جهة اليمين يتغير بصورة جيبية عندما تتغير x ولـكن قيم ذروته (والتـي تقـع عندما تكون ($\omega t_1+\beta x$) مضاعفات فردية (k) للزاوية $\pi/2$ درجـة نصف قطرية) سوف تـزدادبصورة اسيةكلما ازدادت x . وذلك بسبب وجود العامل $e^{\alpha x}$. وهذا مبين في الشكل 1.14 (أ) . تأمل الان زمن t_1+dt . حيث تحدث قيمة ذروة عند مسافة $x+dx$ لذا

$$\omega(t_1+dt)+\beta(x+dx) = k\pi/2 = \omega t_1+\beta x$$
$$dx = -\omega\, dt/\beta.$$

في فترة قصيرة من الزمن مقدارها dt تكون ذروة الموجة قد تحركت مسافـة قصيرة هي dx للتقـرب من الحمل . لذا فان الحد الاول يمثل موجة منتقلة ساقطـة أو أمامية تتحرك من نهاية الارسال (المصدر) الى نهاية الاستلام (الحمل) . تكون سرعة انتشار الموجة هي

$$u = dx/dt = \omega/\beta \text{ كلم / ثانية} \qquad [1.46]$$

طول موجة ما هو المسافة $x = \lambda$ ويعطـي كالاتـي

$$\lambda\beta = 2\pi \text{ درجة نصف قطرية} \qquad [1.47]$$

اذا تفحص الطالب الحد الثانـي على جهة اليمين من [1.45] فسوف يجد انه يمثل موجة منعكسة تتحرك راجعة من نهاية الاستلام الى نهاية الارسال وان قيـم ذروتها تتناقص اسياً كلما ازدادت x (انظر الشكل 1.14 (ب))

لخط لامحدود تكون $b = 0$: حيث لايمكن وجود انعكاس خلفـي من حمل ما عند مسافة لامحدودة من ناحية الارسال . ولايمكن ايضاً حدوث اي انعكاس خلفـي على طول خط محدود منته بالممانعة المميزة له ، Z_c . الاستنتاجات التـي تم التوصل اليها بخصوص موجات الفولتية تطبق ايضاً على موجات التيار المقابلة لهذه الفولتيات (انظر [1.26 ب] وكذلك [1.27 ب])

1.3.7 الخط عديم التشويه DISTORTION-FREE LINE

يرسل خط اتصالات معين اشارة تحتوي على مركبات عديدة لها مقادير وترددات مختلفة اما خرجه فيجب ان يكون مساوياً لدخل الخط نفسه او في الاقل يتناسب معه .

لذا فان التضاؤل وسرعة انتشار الموجة يجب ان يكونا غير معتمدين على التردد . الشرط الاخير هذا يتحقق اذا تناسب معامل تغير الطور β مع التردد (انظـــر [1.46])

ان معامل الانتشار هو

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(Y_1 Z_1)}$$

$$= [(G_1 + j\omega C_1)(R_1 + j\omega L_1)]^{\frac{1}{2}}$$ لـكل كيلو متر

في الامكان بيان ان الشرط الضروري هو

$$R_1/G_1 = L_1/C_1. \quad [\text{أ } 1.48]$$

هذا هو الشرط للنقل عديم التشويه ويخضع للشرط التالـي

$$\alpha = \sqrt{(R_1 G_1)}$$ نيبر / كم [ب 1.48]

$$\beta = \omega\sqrt{(L_1 C_1)}$$ درجة نصف قطرية / كم [ج 1.48]

وينتج من [1.48 أ] ان $\omega L_1/R_1 = \omega C_1/G_1$. وعليه تمتلك كل من Z_1 و Y_1 زوايا الطور نفسها . على هذا الاساس تكون الممانعة المميـــزة

$$Z_c = \sqrt{(Z_1/Y_1)} = \sqrt{(Z/Y)} = \sqrt{(L_1/C_1)}$$ اوم [1.48 د]

وتكون مقاومة صافية . لذا تكون موجات التيار والفولتية في الطور نفسه بعضها مع البعض .

1.3.8 الخط عديم الفقد LOSS-FREE LINE

يتحقق شرط نقل عديم الفقد لجميع قيم L_1 وكذلك C_1 عندما تكـــون $R = 0$ و $G = 0$ (وتتحقق هذه الشروط تقريباً بوساطة خطوط 400 كيلو فولت ذات أربعة موصلات مساحة المقطع العرضـي لـكل موصل 2·6 سم^2 $(X/R \simeq 14)$ وتشتغل تحت ظروف جوية جيدة وفقد الهالة فيها مهمل) . بناء على الشروط اعلاه

$$\gamma = j\omega\sqrt{(L_1 C_1)}$$ لـكل كيلو متر [1.49 أ]

$$\alpha = 0 \quad [\text{ب}1.49]$$

$$\beta = \omega\sqrt{(L_1 C_1)}$$ درجة نصف قطرية / كم [ج 1.49]

$$Z_c = \sqrt{(L_1/C_1)}$$ أوم [د 1.49]

لقد بنيت المعادلتان (المعادلة [2.23] في الفصل الثانـي والمعادلة [3.20] في الفصل الثالث) انه لخط علوي معلن ثلاثـي الطور (باهمال اي فيض مغناطيســي داخل الموصل)

$$L_1 = \frac{\mu}{2\pi}\log_e\left(\frac{D_m}{r}\right) \text{ H/m}$$

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon}{\log_e(D_m/r)} \text{ F/m}$$

حيث ان D_m هي معدل التباعد الهندسـي بين الخطوط وان r هي نصف قطر كل موصل . لذا

$$u = \omega/\beta = 1/(\sqrt{(L_1C_1)}) = 1/(\sqrt{(\mu\epsilon)}) \text{ m/s.} \qquad [\text{1.50 أ}]$$

ولـكن

$$\mu = \mu_o\mu_r \text{ where } \mu_o = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

وكذلك

$$\epsilon = \epsilon_o\epsilon_r \text{ where } \epsilon_o = 1/(4\pi\times 9\times 10^9) = 8{\cdot}854\times 10^{-12} \text{ F/m}$$

عليه

$$u = 3\times 10^8/\sqrt{(\mu_r\epsilon_r)} \qquad [\text{1.50 ب}]$$

وكذلك

$$Z_c = \frac{\sqrt{(\mu/\epsilon)}}{2\pi}\log_e(D_m/r) \text{ ohms.} \qquad [\text{1.50 ج}]$$

ولحالة خط لامغناطيسـي في الهواء تـكون $\mu_r = \epsilon_r = 1$ وكـذلك $u = 3\times 10^8$ متر / ثانية

وهي سرعة الانتشار الـكهرومغناطيسـي في الهواء (الفراغ) : وايضا

$$Z_c = 60\log_e(D_m/r) \text{ أوم} \qquad [\text{1.50 د}]$$

القيم النموذجية للمانعة المميزة Z_c للخطوط العلوية المعلقة تقع بين 250 و 350 أوم (وللقابلوات تكون حوالـي 30 الى 50 أوم (انظر [1.50 ج])) .

وينتج من [1.46] وكذلك [1.47] ان

$$\lambda = 2\pi/\beta = \omega/\beta f = u/f. \qquad [\text{1.50 هـ}]$$

لذا يكون طول الموجة لخط قدرة عديم الفقد ذي تردد 50 هرتز هو 6000 كيلومتر .

ان تاثير الفيض الداخلـي واستخدام الموصلات المغناطيسية (كالموصلات المصنوعة من الالمنيوم ذات اللب الفولاذي – راجع الفصل 4) هو زيادة المحاثة L_1 وتقليل قيمة u و λ تحت القيم المذكورة اعلاه .

ان معادلات النقل للخط عديم الفقد سوف تناقش لاحقا في الفقـرة 1.6 .

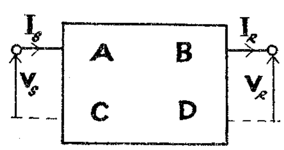
1.4 الشبكة ذات الاطراف الاربعة (ذات المنفذين) العامة :– الثوابت. ABCD

General 4-terminal (2-port) Network: ABCD Constants

ان تمثيلات الخط القصير ودوائر Π و T الاسمية وكذلك الخط الطويل المتجانس التي تمت مناقشتها مسبقاً هي طرق خاصة لحل مشاكل متشابهة وبالتحديد لتحليل اداء خط نقل معلوم . والتوجه الحديث هو الى ايجاد طريقة ما تكون عامة في تطبيقاتها . لذلك يجب ان يفهم أن ماسنذكره يمكن تطبيقه على أية دائرة مع كونه يخص بصورة رئيسية خطوط النقل . اما التحديدات في هذا المجال فهي ان الدوائر (المبينة في الشكل 1.15) يجب ان تكون ذات اربعة اطراف (أو منفذين) وكذلك تكون هامدة (لايوجد مصدر داخلي للقوة الدافعة الكهربائية أو للقدرة) وخطية (ثابتة الممانعات ، لاتعتمد على مقدار الفولتية عبرها أو التيار المار فيها أو أي متغير آخر) وتكون كذلك ذات اتجاهين (الممانعات نفسها بغض النظر عن اتجاه سريان التيار) . على هذا الاساس فان هذه الدوائر لا تشمل تلك التي لها ملفات ذات قلب حديد وكذلك المقومات . اما المحولات فيمكن شمولها اذا ما اهمل تيار الاثارة في حالة اللاحمل في الدوائر المتفرعة (المتوازية) أو عومل على اساس كونه خطياً .

اذا عد كل من V_R و I_R متغيرين غير معتمدين اي يمكن ان يعطى لهما أية قيمة فان V_S و I_S يصبحان متغيرين معتمدين ويكون اعتمادهما على V_R و I_R وينسبان اليهما بالمسامحة Y والممانعة Z للخط . والصيغة العامة للمعادلات الخطية الانية الناتجة هي

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{A}\mathbf{V}_R + \mathbf{B}\mathbf{I}_R \qquad [\text{أ} \quad 1.52]$$
$$\mathbf{I}_S = \mathbf{C}\mathbf{V}_R + \mathbf{D}\mathbf{I}_R. \qquad [\text{ب} \quad 1.52]$$



الشكل 1.15 شبكة ذات أطراف أربعة

ان A ، B ، C وكذلك D تدعى بثوابت الشبكة ذات الاطراف الاربعة العامة . وهي الحروف الهجائية الاولى الاربعة فقط (ولا تكون B هي التقبلية وكذلك لاتكون C متسعة) . المقارنة بين الثوابت ABCD لعدة تمثيلات لخطوط النقل قد تم عملها مسبقاً في الجدول 1.1 في الفقرة 1.3.2 . اما وحدات A,B,C وكذلك D فيجب ان تكون بحيث تؤلف معادلات متوافقة . لذا يجب ان لاتمتلك A و D اي وحدات ، اما B فيجب ان تكون ممانعة وكذلك C يجب ان تكون مسامحة .

1.4.1 هبوط الفولتية وانتظام الفولتية المتلازم .

VOLTAGE DROP AND INHERENT VOLTAGE REGULATION

ان هبوط الفولتية وانتظام الفولتية المتلازم لخط ما قد تم التطرق اليهما في الفقرة 1.2.1 . وكلا هذين التعبيرين مفروضان ليشيرا الى الحمل المقنن عند نهاية الاستلام للخط الا اذا أشير الى غير ذلك ؛ أو ليشيرا الى مولد يجهز خرجاً مقنناً أو محول مجهز بفولتية ابتدائي مقننة ويعطي تياراً ثانوياً مقنناً . والمحول يقنن بدلالة نسبة فولتية اللاحمل له وخرجه المقنن والذي هو حاصل ضرب فولتية اللاحمل له في تيار الحمل الكلي في الثانوي (المواصفات القياسية البريطانية – رقم 17) . لذا فللحمل المقنن ، يمكن حساب V_S من [1.52 أ] وكذلك

$$\text{الهبوط بالفولتية} = V_S - V_R \quad \text{فولت} \qquad [1.53\ \text{أ}]$$

بابقاء قيمة V_S مساوية الى قيمتها في حالة الحمل الكلي فان قيمة فولتية نهاية الاستلام في حالة اللاحمل V_{Ro} تستخرج من المعادلة [1.52 أ] كالاتي

$$V_{Ro} = V_S/A \quad \text{فولت} \qquad [1.53\ \text{ب}]$$

وكذلك

$$\text{انتظام الفولتية المتلازم} = V_{Ro} - V_R \quad \text{فولت} \qquad [1.53\ \text{ج}]$$

ويعبر عادة عن هبوط الفولتية وانتظام الفولتية المتلازم بالنسبة المئوية من الفولتية المقننة . نذكر الطالب بانه عندما يحتوي خط على متسعة توازٍ ويشتغل في حالة اللاحمل فان فولتية اللاحمل لنهاية الاستلام V_{Ro} تكون عادة اكبر من فولتية نهاية ارساله ، V_S ، وذلك لكون $A < 1$.

1.4.2 الشبكة الهامدة المتماثلة SYMMETRICAL, PASSIVE NETWORK

باستخدام نظرية التعاكس سوف نبين انه لشبكة متماثلة

$$A = D \qquad [1.54]$$

ولشبكة هامدة يكون المحدد كالاتي

$$\begin{vmatrix} A & B \\ C & D \end{vmatrix} = AD - BC = 1. \qquad [1.55]$$

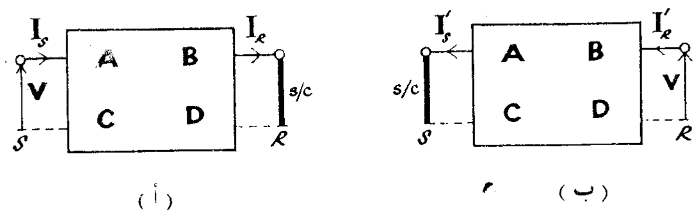
في الشكل [1.16 (أ)] يكون الخرج مقصور الدائرة وعليه تصبح [1.52]

$$V = BI_R$$
$$I_S = DI_R$$

وممانعة الدائرة القصيرة لممانعة نقطة السوق (الدخل) عند نهاية الارسال تكون

$$Z_{ds} = B/D$$

لم تتغير الشبكة في الشكل 1.16 (ب) . لكن قطبيات التيارات هي التي انعكست .



الشكل 1.16 شبكة هامدة متماثلة .

لذا ففي [[1.52] يمكننا كتابة $-I'_S$ للتيار I_S وكذلك $-I'_R$ للتيار I_R
وايضاً $V_S = 0$ وكذلك $V_R = V$. لذا

$$0 = AV - BI'_R$$
$$-I'_S = CV - DI'_R$$

وتكون عندئذ ممانعة نقطة السوق (الدخل) في حالة الدائرة القصيرة في نهاية الاستلام هي

$$Z_{ds} = V/I'_R = B/A$$

واذا كانت الشبكة متماثلة ، فيجب ان تكون ممانعتا الدخل متساويتين ، وعليه فان

$$A = D$$

تنص نظرية التعاكس بانه اذا سببت فولتية V في احد الفروع لشبكة خطية هامدة تيار I_R في فرع آخر في الشبكة فان الفولتية نفسها في الفرع الثاني سوف تسبب التيار نفسه في الفرع الاول . وعليه فان

$$I_R = I'_S$$
$$V/B = -CV + DAV/B$$
$$AD - BC = 1.$$

1.4.3 قياس المعالم MEASUREMENT OF PARAMETERS

تكون ممانعة نقطة السوق (الدخل) لشبكة ذات اطراف – اربعة مربوط عليها حمل معطى بممانعة $Z_R = V_R/I_R$ كما يلي

$$Z_d = \frac{V_S}{I_S} = \frac{AV_R + BI_R}{CV_R + DI_R} = \frac{AZ_R + B}{CZ_R + D}. \qquad [1.56]$$

واذا كانت $Z_d = Z_R$ يكون

$$CZ_R^2 + (D - A)Z_R - B = 0.$$

واذا كانت الشبكة متماثلة عندئذ تكون $A = D$ وكذلك $Z_d = Z_R$ عندما تكون

$$Z_R = \sqrt{(B/C)}. \qquad [1.57]$$

تدعى هذه القيمة الخاصة من Z_R بالممانعة المميزة للشبكة : للشبكة المتماثلة تكون الممانعات المميزة والخيالية والدورية متساوية جميعها . تكون هذه الممانعات مهمة لمهندس الأتصالات وتكمن اهميتها في انتقال القدرة العظمى بين شبكتين متوافقتين . على الطالب ان يتحقق من أنه اذا استخدم [*1.28*] فان Z_R المعطاة بالمعادلة [*1.57*] تكون مساوية للممانعة المميزة Z_c (او Z_o في كتب كثيرة اخرى) لخط طويل متجانس (أنظر الفقرة *1.6* بشأن التحميل الطبيعي لخطوط نقل القدرة).

عندما تكون الشبكة مفتوحة الدائرة فان ممانعة الدخل تصبح من [1.52] ،

$$Z_{do} = A/C \qquad [1.58]$$

وكذلك عندما تكون مقصورة الدائرة ، فممانعة الدخل تكون

$$Z_{ds} = B/D. \qquad [1.59]$$

اذا كانت الشبكة من النوع المتماثل الهامد ، فعلى الطالب ان يبين ان

$$A = \sqrt{[Z_{do}/(Z_{do} - Z_{ds})]} = D \qquad [1.60\text{أ}]$$

$$B = AZ_{ds} \qquad [1.60\text{ب}]$$

$$C = A/Z_{do}. \qquad [1.60\text{ج}]$$

ان أياً من هذه المعالم يمكن اعطاء تفسير فيزياوي له بدلالة المعلومات التي يتم الحصول عليها من خلال فحص الدائرة المفتوحة والدائرة القصيرة. لذلك فمن فحص الدائرة المفتوحة

$$A = V_{So}/V_{Ro} \qquad [1.61\text{أ}]$$

وهي الدالّة التحويلية لفولتية الدائرة المفتوحة =

تشير كلمة التحويلية الى ان كلتا الفولتيتين تقاسان في الوقت نفسه عند طرفي الخط . الا انه من الصعوبة العملية تطبيق هذا الاقتراح على خطوط نقل القدرة وذلك بسبب محاولة تضمين قياس فرق الطور بين V_{So} و V_{Ro} . في حالة الدائرة القصيرة

$$B = V_{Ss}/I_{Rs} = Z_{ts} \qquad [1.61\text{ب}]$$

وهي الممانعة التحويلية للدائرة القصيرة

في حالة الدائرة المفتوحة

$$C = I_{So}/V_{Ro} = Y_{to} \qquad [1.61\text{ج}]$$

وهي المسامحة التحويلية للدائرة المفتوحة

في حالة الدائرة القصيرة

$$D = I_{Ss}/I_{Ro} \qquad [1.61\text{د}]$$

وهي الدالـة التحويلية لتيار الدائرة القصيرة

1.4.4 تطبيق طرق المصفوفات APPLICATION OF MATRIX METHODS

تكون معادلات الشبكة ذات الاطراف الاربعة مناسبة جداً للتعامل معها بوساطة طرق المصفوفات . لذا يمكن اعطاء [1.52] كما يلي

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_S \\ \mathbf{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_R \\ \mathbf{I}_R \end{bmatrix} \qquad [1.62]$$

والمصفوفة

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{D} \end{bmatrix}$$

تدعى بمصفوفة التحويل للشبكة

أما الان فسنتطرق الى بعض الحالات الخاصة للشبكات ذات الأطراف الاربعة (انظر الجدول 1.2) .

أ) ممانعة التوالي Z : خط قصير أو منوب

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R + \mathbf{Z}\mathbf{I}_R$$
$$\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_R$$

مصفوفة التحويل هي

$$\begin{bmatrix} 1 & \mathbf{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix},$$

ب) مسامحة التوازي Y : دائرة محول في حالة اللاحمل

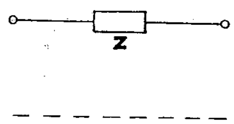
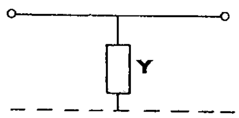
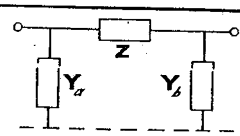
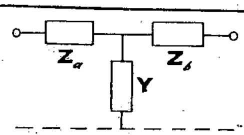
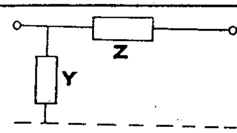
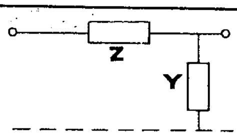
$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R$$
$$\mathbf{I}_S = \mathbf{Y}\mathbf{V}_R + \mathbf{I}_R$$

مصفوفة التحويل هي

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \mathbf{Y} & 1 \end{bmatrix}.$$

ج) شبكة Π غير متماثلة .

جدول 1-2 معالم الشبكات

	الشبكة	A	B	C	D
(أ)		1	Z	0	1
(ب)		1	0	Y	1
(جـ)		$1+Y_bZ$	Z	$Y_a+Y_b+Y_aY_bZ$	$1+Y_aZ$
(د)		$1+YZ_a$	$Z_a+Z_b+YZ_aZ_b$	Y	$1+YZ_b$
(هـ)		1	Z	Y	1+YZ
(و)		1+YZ	Z	Y	1
(ز)	تعاقب (الشكل 1.17)	$A_1A_2+B_1C_2$	$A_1B_2+B_1D_2$	$C_1A_2+D_1C_2$	$C_1B_2+D_1D_2$
(ح)	توال (الشكل 1.18)	$\frac{A'}{C'}+\frac{A''}{C''}$	$-\left(\frac{1}{C'}+\frac{1}{C''}\right)$	$\frac{1}{C'}+\frac{1}{C''}$	$-\left(\frac{D'}{C'}+\frac{D''}{C''}\right)$
(ط)	تواز (الشكل 1.19)	$\frac{D'}{B'}+\frac{D''}{B''}$	$-\left(\frac{1}{B'}+\frac{1}{B''}\right)$	$\frac{1}{B'}+\frac{1}{B''}$	$-\left(\frac{A'}{B'}+\frac{A''}{B''}\right)$

ملاحظة مكونات (*h*) هي Z_{ss} , Z_{sr}, Z_{rs}, Z_{rr} ([*1.65*])
ومكونات (*i*) هي Y_{ss} , Y_{sr} , Y_{rs} وكذلك Y_{rr} ([*1.68*])

ان هذه عبارة عن ربط تعاقبي لمسامحة توازٍ تتبعها ممانعة توالٍ وتتبعها كذلك مسامحة توازٍ . ويتم الحصول على مصفوفة التحويل الكلية بضرب المصفوفات التحويلية للاجزاء المكونة الثلاثة . لذا

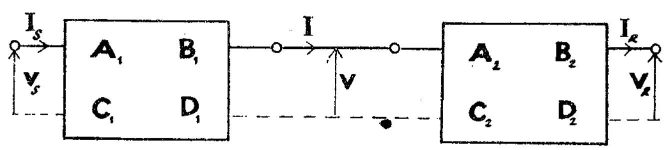
$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ Y_b & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (1+Y_bZ) & Z \\ (Y_a+Y_b+Y_aY_bZ) & (1+Y_aZ) \end{bmatrix}$$

اذا كانت الشبكة متماثلة وكانت $Y_a = Y_b = Y/2$. حيث Y هي مسامحة التوازي الكلية ، فعندئذ تقلص المصفوفة التحويلية الى تلك التي لخط نقل Π الاسمي (انظر الجدول 1.1) .

على الطالب ان يتحقق من العلاقات المعطاة في (د) و (هـ) و (و) من الجدول 1.2 . الدوائر في (هـ) و (و) تعطي التمثيل التقريبي لمحول قدرة .

(ز) يبين الشكل (1.17) شبكتين رباعيتي الاطراف مربوطتين على التعاقب .

باستطاعة الطالب ان يحصل على الثوابت ABCD للشبكة الكلية بالتعبير عن V و I بدلالة V_R و I_R ، وبعدها V_S و I_S بدلالة V و I ، ومن ثم حذف V و I .



الشكل 1.17 شبكتان رباعيتا الاطراف مربوطتان على التعاقب

لذا يمكن الحصول على مصفوفة التحويل (وايضا الثوابت A, B, C, D) بطريقة اخرى وذلك بضرب مصفوفتي التحويل للشبكتين ببعضهما وكالاتي

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ I \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} (A_1A_2+B_1C_2) & (A_1B_2+B_1D_2) \\ (C_1A_2+D_1C_2) & (C_1B_2+D_1D_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}. \qquad [1.63] \end{aligned}$$

(ح) يمكن اعادة ترتيب المعادلة [1.52] لتعبر عن الفولتيتين V_S و V_R بدلالة التيارين I_S و I_R . وبما ان الشبكات هي هامدة . يكون $AD - BC = 1$ وكذلك

$$V_S = (A/C)I_S-(1/C)I_R \qquad [\text{أ}1.64]$$

$$V_R = (1/C)I_S-(D/C)I_R. \qquad [\text{ب}1.64]$$

وهاتان المعادلتان يمكن كتابتهما كالاتي

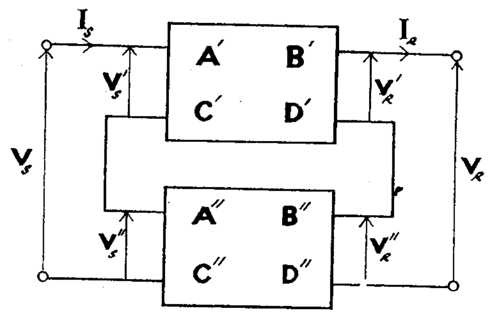
$$V_S = Z_{SS}I_S+Z_{SR}I_R \qquad [\text{أ}1.65]$$

$$V_R = Z_{RS}I_S+Z_{RR}I_R \qquad [\text{ب}1.65]$$

وكذلك يمكن تقليصهما اكثر الى صيغة مصفوفة

$$[V] = [Z][I].$$

حيث ان Z_{SS} هي ممانعة الدائرة المفتوحة لممانعة نقطة السوق عند نهاية الارسال والتي استعمل الرمز Z_{do} لتمثيلها في الفقرة 1.4.3. من هذا الفصل. اما Z_{RS} و Z_{SR} ، واللتان تكونان متساويتين في الشبكة الثنائية الطرف ، فهما الممانعتان التحويليتان للدائرة المفتوحة. وعليه فمن المعادلة [1.61 جـ] تكون $Z_{RS} = 1/Y_{to}$. اما [Z] فتدعى مصفوفة الممانعة للشبكة. ويمكن التعرف على مكونات هذه المصفوفة بدلالة الثوابت A, B, C ، D من المعادلة 1.64 .



الشكل 1.18 شبكتان رباعيتا الطرف مربوطتان على التوالي

$V_S = V_S'+V_S''$ $\qquad V_R = V_R'+V_R''$

تبسط مصفوفة الممانعة مسائل الشبكات رباعية الطرف المربوطة على التوالي . اي ان .

دخليهما يكونان على التوالي . وكذلك يكون خرجاهما على التوالي ايضا (انظر الشكل 1.18) . واذا عرفت الشبكتان بالرمزين العلويين (′) و (″) يكون

$$\begin{bmatrix} V'_S \\ V'_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z'_{SS} & Z'_{SR} \\ Z'_{RS} & Z'_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix}$$

وتكون معادلة الشبكة ($''$) مشابهة للمعادلة اعلاه . وبما ان V_S و V_R كليهما تتكونان من مجموع الاجزاء المكونة لهما فان .

$$\begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_S \\ V'_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V''_S \\ V''_R \end{bmatrix} = \Big[[Z'] + [Z''] \Big] \begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} \qquad [1.66]$$

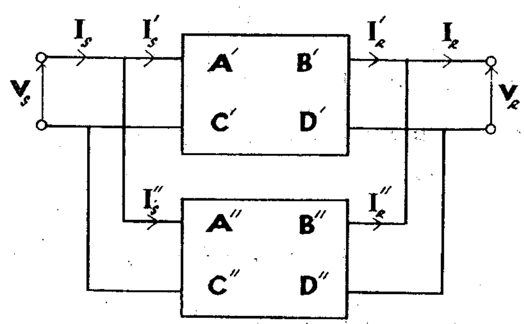
(ط) يبين الشكل 1.19 شبكتين مربوطتين على التوازي : دخلاهما يكونان على التوازي وكذلك خرجاهما على التوازي ايضا . وقد وجد ان مصفوفة مسامحة الشبكة الكلية تكون

$$[I] = [Y][V]$$

$$\begin{bmatrix} I_S \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{SS} & Y_{SR} \\ Y_{RS} & Y_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ V_R \end{bmatrix} \qquad [1.67]$$

حيث ان

$$[Y] = [Y'] + [Y''] = \begin{bmatrix} \left(\frac{D'}{B'} + \frac{D''}{B''}\right) & -\left(\frac{1}{B'} + \frac{1}{B''}\right) \\ \left(\frac{1}{B'} + \frac{1}{B''}\right) & -\left(\frac{A'}{B'} + \frac{A''}{B''}\right) \end{bmatrix} \qquad [1.68]$$



الشكل 1.19 شبكتان رباعيتا الطرف مربوطتان على التوازي

$I_S = I'_S + I''_S \qquad I_R = I'_R + I''_R$

1.4.5 مخطط الاداء للشبكة ذات الاطراف الاربعة

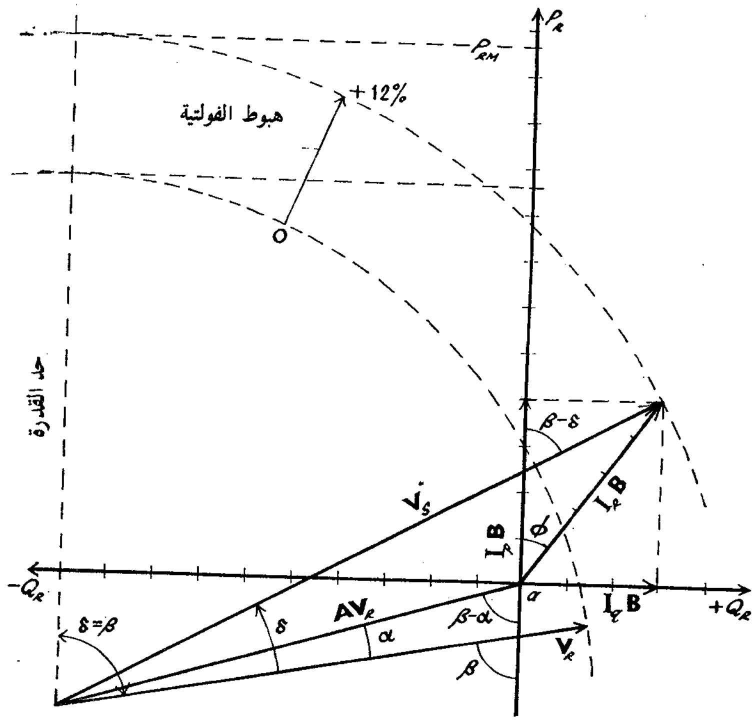
PERFORMANCE CHART FOR THE 4-TERMINAL NETWORK

ان مخطط الاداء لنهاية استلام الخط الطويل المبين في الشكل 1.20 (المخطط الدائري) والذي عومل بوصفه شبكة ذات اربع اطراف ويشتغل بفولتية نهاية استلام ثابتة ، يمكن الحصول عليه بالطريقة التي استخدمت للخط القصير (الفقرة 1.2.2) وباستخدام المعادلة $\mathbf{V}_S = \mathbf{A}\mathbf{V}_R + \mathbf{B}\mathbf{I}_R$ ، حيث $\mathbf{A} = A\underline{/\alpha}$ و $\mathbf{B} = B\underline{/\beta}$ أوم / طور . (α و هنا ليستا معاملي التضاؤل وتغير الطور كما ورد آنفا) . ان قيمة A النموذجية لخط طويل قد تكون $0{\cdot}98\underline{/0{\cdot}5^\circ}$ وقيمة B تكون مساوية تقريبا لممانعة التوالي الكلية للخط ، Z . ولجعل مخططات الخط عامة التطبيق فمن المعتاد جعل قيمة A صغيرة جدا وكذلك جعل قيمة α اكبر بكثير من القيم العملية : كذلك يبالغ بقيمة BI_R نسبة الى V_R .

في البداية يتم رسم المخطط الطوري بمقياس الفولتية في حالة اللاحمل ($\mathbf{I}_R = 0$) وهذا يعني ان $\mathbf{V}_S = \mathbf{A}\mathbf{V}_R$. عند تسليط حمل ذي عامل قدرة احادي (عند نهاية الاستلام) بصورة تدريجية متساوية ، فان المحل الهندسي للفولتية $\mathbf{V}_S$ سوف يتحرك باتجاه محور القدرة (P_R) باجزاء متساوية تكون قيمة كل منها (عدديا) هي

(اجزاءالقدرة =) $BI_p \propto V_R I_p$

لخط معلوم يشغل بفولتية نهاية استلام ثابتة . لذا من الممكن تقسيم مقياس محور القدرة بحيث يمثل اجزاء متساوية صغيرة من القدرة . واذا ما سلط حمل ذو عامل قدرة صفري ومتأخر باجزاء متساوية ، فالمحل الهندسي للفولتية $\mathbf{V}_S$ سوف يتحرك الان باتجاه محور ال var ($+Q_R$) باجزاء متساوية ايضاً . لهذا فان محور ال vars يمكن تقسيم مقياسه ليمثل اجزاء صغيرة متساوية من ال vars (القدرة المتفاعلة) . سوف يكون مقياس القدرة الفعالة في هذه الحالة مساوياً لمقياس القدرة المتفاعلة (vars) لان العاملين B و V_R مشتركان لكليهما . ولاي حمل متجهز عامل قدرة $\cos\phi$ ، سوف يتحرك المسار الهندسي للفولتية $\mathbf{V}_S$ باتجاه المطاور $\mathbf{B}\mathbf{I}_R$ وسيكون مقياس الفولت امبيرات مساوياً عددياً لمقياس القدرة الفعالة ومقياس القدرة المتفاعلة يتم عادة ايجاد مقياس الفولت امبيرات ومقياس القدرة وكذلك مقياس ال vars برسم المخطط بمقياس فولتية ، لحمل معلوم ، وقسمة فولت امبيرات الحمل الحقيقية بطول مقياس BI_R .



الشكل 1.20 مخطط الاداء لشبكة رباعية الاطراف

ان الاستنتاجات المراد استخراجها من هذا المخطط هي نفسها التي تكون للخط القصير. يتطلب تجهيز قدرة ثابتة بعامل قدرة متناقص ومتأخر زيادة الفولتية V_S وتقليل زاوية الحمل δ . ولتجهيز حمل ذي فولت امبيرات ثابتة وعامل قدرة متغير فالمحل الهندسي للفولتية V_S يكون دائرة متمركزة في a ذات نصف قطر BI_R . اذا أشتغل الخط بفولتيات ثابتة لنهايتيه فعندئذ اذا ازدادت δ فسوف تزداد القدرة المجهزة ويتغير عامل القدرة من قيمة متاخرة ماراً بقيمة الواحد الى ان يصبح متقدماً ، وهذا يتطلب زيادة تجهيز البخارللمولد في نهاية الارسال كماتمت الاشارة اليه في الفقرة1.2.2

يبين الشكل 1.20 انه عند زيادة زاوية الحمل δ فان هناك حداً علوياً للقدرة التي يمكن تجهيزها بوساطة خط معين ، وان الحد المذكورهذا يقع عندما تكون $\delta = \beta$. ان حد القدرة هو دالة للفولتية V_S .

بضرب كل من المطاورات في الشكل 1.20 بالقيمة V_R/B ، يصبح المطاور BI_R (عدديا) مساويا $V_R I_R$ ، وهو الحمل بالفولت امبيرات المجهز . وقد يرسم المخطط بصيغته الجديدة بمقياس الفولت امبير مباشرة ويمكن ايجاد مقياس الفولتية المقابل وذلك بقسمة فولتية الحمل الحقيقية على طول مقياس V_R^2/B

1.4.6 معادلات القدرة : حدود القدرة POWER FORMULAE: POWER LIMITS

ان معادلات القدرة المجهزة لكل طور من الحمل P_R والقدرة المتفاعلة المتاخرة المقابلة لها Q_R ، يمكن الحصول عليها بدلالة الفولتيتين $\mathbf{V}_S$ و $\mathbf{V}_R$ والمعالم A, B, C, D وذلك بالطريقة التي استخدمت للخطوط القصيرة (انظر الفقرة 1.2.3) .

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{A}\mathbf{V}_R + \mathbf{B}\mathbf{I}_R$$
$$\mathbf{I}_R = (\mathbf{V}_S/\mathbf{B}) - (\mathbf{A}\mathbf{V}_R/\mathbf{B})$$
$$= (V_S/B)\underline{/\delta-\beta} - (AV_R/B)\underline{/\alpha-\beta}$$

حيث اخذت $\mathbf{V}_R$ على أنها مطاور مرجع $\mathbf{V}_R = V_R\underline{/0°}$ ، وكذلك δ هي زاوية الحمل ، الزاوية التي تتقدم بها $\mathbf{V}_S$ على $\mathbf{V}_R$: وايضا $\mathbf{A} = A\underline{/\alpha}$ وان $\mathbf{B} = B\underline{/\beta}$. ومترافق التيار $\mathbf{I}_R$ هو

$$\mathbf{I}_R^* = (V_S/B)\underline{/\beta-\delta} - (AV_R/B)\underline{/\beta-\alpha}$$

وفولت امبيرت الحمل / طور تكون (انظر الملحق 4) .

$$\mathbf{S}_R = \mathbf{V}_R\mathbf{I}_R^*$$
$$P_R = (V_S V_R/B)\cos(\beta-\delta) - (AV_R^2/B)\cos(\beta-\alpha) \qquad [1.69\ أ]$$
$$Q_R = (V_S V_R/B)\sin(\beta-\delta) - (AV_R^2/B)\sin(\beta-\alpha). \qquad [1.69\ ب]$$

بمعاملة P_R بوصفها دالة للزاوية δ فقط ، فسوف تكون P_R اعظم مايمكن (P_{RM}) عندما $\delta = \beta$ وبذلك

$$P_{RM} = (V_S V_R/B) - (AV_R^2/B)\cos(\beta-\alpha). \qquad [1.70\ أ]$$

والقيمة المقابلة للقدرة المتفاعلة عند حد القدرة هذا تكون

$$Q_{RM} = -(AV_R^2/B)\sin(\beta-\alpha) \qquad [1.70\ ب]$$

حيث تشير العلامة السالبة الى ان الفولت امبيرات تكون متأخرة بالطور وتنساب من الحمل الى المصدر (الفولت امبيرات المتقدمة تنساب من المصدر الى الحمل) . مما يجب ملاحظته أن Q_{RM} تكون غير معتمدة على V_S وكذلك δ .

ان المعادلة اعلاه يمكن تبسيطها عندما يكون $V_S = V_R$ وبالخصوص اذا كانت الفولتيتان في نهايتي خط متساويتين وازدادتا بنسبة 10 % فان حد القدرة يزيد

$$P_{RM} = (V_R^2/B)[1 - A\cos(\beta-\alpha)]. \qquad [1.71]$$

أيضاً بحوالي 20 ٪ : ويزيد حد القدرة اذا قلت B . حيث ان B هي الممانعة التحويلية للدائرة القصيرة (انظر [1.61 ب]) .

اذا تم حذف δ بين المعادلتين [1.69 أ] و [1.69 ب] يكون

$$[P_R + (AV_R^2/B)\cos(\beta-\alpha)]^2 + [Q_R + (AV_R^2/B)\sin(\beta-\alpha)]^2 = (V_S V_R/B)^2. \qquad [1.72]$$

تكون هذه المعادلة مقيدة اذا علمت القيم P_R و Q_R وكذلك V_S وكان المطلوب هو ايجاد قيمة V_R .

اذا ضربت كل مكونة من مكونات المخطط الطوري المبين في الشكل 1.20 (والمرسوم بمقياس فولتية عندما تكون V_R ثابتة) بالقيمة V_R/B فعندئذ يتحول المقياس الى مقياس الفولت امبيرات (ولم يعد المخطط المذكور مخططاً طورياً) . ان جميع المعادلات السالفة يمكن تفسيرها بدلالة هذا المخطط . فمثلاً تكون [1.72] معادلة دائرة يكون فيها V_S ثابتاً .

في النواحي العملية تكون الزاوية δ ، زاوية الحمل اوزاوية النقل ، صغيرة نوعاً ما . ومن غير المستحب أن تزيد عن $30°$ حتى للخطوط الطويلة جداً (500 كيلومتر) التي تقوم بنقل حمل مقنن .

يجب على الطالب اشتقاق معادلات القدرة والقدرة المتفاعلة المتأخرة الذاهبة الى نهاية الارسال لخط طويل وذلك باستخدام المعادلة [1.32 أ] وكما في ادنـــــاه

$$\mathbf{V}_R = \mathbf{D}\mathbf{V}_S - \mathbf{B}\mathbf{I}_S$$

حيث $\mathbf{D} = D\underline{/\Delta}$ (لخط متماثل تكون $\mathbf{D} = \mathbf{A} = A\underline{/\alpha}$)

$$P_S = (DV_S^2/B)\cos(\beta-\Delta)-(V_SV_R/B)\cos(\beta+\delta) \qquad [1.73\ \text{أ}]$$
$$Q_S = (DV_S^2/B)\sin(\beta-\Delta)-(V_SV_R/B)\sin(\beta+\delta). \qquad [1.73\ \text{ب}]$$

وسوف تكون P_S اعظم P_{SM} ممكن عندما تكون $\beta+\delta=180°$ وكذلك

$$P_{SM} = (DV_S^2/B)\cos(\beta-\Delta)+(V_SV_R/B). \qquad [1.74\ \text{أ}]$$

وقيمة Q_S المقابلة عند حد القدرة هذا تكون

$$Q_{SM} = (DV_S^2/B)\sin(\beta-\Delta). \qquad [1.74\ \text{ب}]$$

ومما يجب ملاحظته ان حد القدرة في نهاية الارسال ونهاية الاستلام لا يحدث في قيمة زاوية الحمل δ نفسها.

يترك للطالب تمريناً ليرسم مخطط اداء نهاية الارسال (V_S ثابت) لخط طويل ، اولاً مقياس الفولتية . وبعده لمقياس فولت أمبير . ويحقق صحة تطبيق المعادلات أنفاً عندما تكون V_S ثابتة .

ان القدرة المفقودة في خط طويل تحسب بالعلاقة P_S-P_R والقدرة المتفاعلة المتأخرة بالعلاقة Q_S-Q_R وذلك لقيمة معطاة للزاوية δ .

1.5 تعويض القدرة المتفاعلة Reactive Power Compensation

ان القدرة المتفاعلة أو الفولت اميرات المتفاعلة معرفتان ومناقشتان في الملحق 4 . وتعرف القدرة المتفاعلة (vars) بكونها موجبة عندما يكون انسيابها الى محاثة . في واشتغال منظومة قدرة . تؤخذ القدرة المتفاعلة اصطلاحاً لتشير الى ال vars المتأخرة ويعين بذلك اتجاه التدفق لاية قطعة من الأجهزة مستوردة أو مصدرة للـ vars . عليه فان أية محاثة تستورد الـ vars . أما المتسعة فتمتص vars متقدمة ويقال عنها مصدرة (أو مولدة) للـ vars .

ان مخطط الاداء لماكنة تزامنية يكون مشابهاً للمخططات المبينة في الاشكال 1.6 , 1.5, 1.4 (للخط القصير) وذلك بوضع E_o بدل V_S و V بدل V_R مع الاخذ بنظر الاعتبار ان الممانعة التزامنية للمولد تكون أكبر بكثير من ممانعة الخط القصير. وحيثما كانت ماكنة تزامنية مستوردة أو مصدرة للقدرة (أنظر الاشكال 7.21, 7.18, 7.17) ، فانها تصدر (أو تولد) الـ vars عندما تكون في حالة مفرطة – الاثارة وتستورد الـ vars في حالة دون الاثارة – تستورد معظم الاحمال الـ vars وذلك لتغذية تيارات المغنطة للمحولات والمحركات الحثية ، الخ . في أية لحظة زمنية يكون الطلب على vars في الشبكة الكبرى ثابتاً بالمقدار والموقع ويتحدد بالفولتية المجهزة عند طرف المستهلكين (تكون المنشآت في حالة اشتغال في ذلك الوقت) .

في الفقرة 1.2.4 تمت مناقشة العلاقة بين الطلب الحاصل على الـ vars والهبوط بالفولتية على طول خط قصير مفرد ، حيث تم بيان السبب الاول لهبوط الفولتية بانه نتيجة لمرور تيار متفاعل ومتأخر في محاثة التوالي للخط : وهذه المقولة تتحقق بصورة خاصة عندما تكون مفاعلة الخط أكبر من مقاومته . كذلك فالتيار المتفاعل لا يجود باي نفع وانما يسبب علاوة على ذلك مفاقيد I^2R في عموم الشبكة . عليه فان الفولت امبيرات vars يجب ان تتولد في المساحات المستوردة في المنظومة حيثما كان هذا ممكناً من الناحية التقنية . الغرض من الشبكة الكبرى هو نقل القدرة باقل قيمة ممكنة للفولت امبيرات المتفاعلة vars . ولكمية معينة للـ var المنقولة عبر خط ما يكون الهبوط بالفولتية بنسبة الوحدة عالياً اذا كانت ممانعة الخط عالية ، أي ان مستوى العطل يكون واطئاً (انظر الفقرة 8.2.2) . العكس يكون صحيحاً بالنسبة للخطوط الثقيلة التحميل القصيرة الطول ذات الفولتية 400 ك . ف والتي تنقل كميات كبيرة من القدرة .

تسمى الفولتية عند جميع قضبان التوزيع لمنظومة الشبكة الكبرى ، نسبة الى الفولتية الاسمية ، بمنسوب الفولتية . وبما أن قواطع الدورة والمحولات وعوازل الخطوط لمنظومة 400 ك . ف تشتغل ضمن حدود قريبة من القيم المصممة عليها هذه الأجهزة فان اعظم فولتية مسموح بها في هذه الحاله هي 420 ك . ف (أي +5٪) . عليه فان الشبكة الكبرى ذات 400 ك . ف قد تشتغل بمنسوب فولتية حوالي ± 5٪ وتبعاً لذلك فقد يتحتم على بعض خطوط 400 ك . ف ان تغذي حملاً مع هبوط فولتية أقل من 10 ٪ . وعليه يجب ان يكون عامل القدرة قريباً من الواحد أ متقدماً . يكون هذا حقيقياً بصورة خاصة للخطوط الأطول (> 125 كيلو متراً) . هنا يجب ان نذكر الطالب ماجاء في

التعليق في الفقرة 1.2.2 من أهم العوامل التي تؤثرعلى هبوط الفولتية هي حاصل ضرب مقدار الحمل في مسافة النقل (أي MVA –كم) وكذلك عامل القدرة . تعمل عادة منظومات القدرة ذات فولتية 275 ك . ف فأقل ضمن حوالي ± 10% .

يبين الشكل 1.20 مخطط أداء لخط طويل وقد عومل كانه شبكة ذات اربع اطراف . في فترات الحمل الاعظم تكون الـ vars الممتصة من قبل محاثة التوالي للخط ($2\pi fLI^2$) أكبر من الـ vars المتولدة بوساطة سعة التوازي للخط نفسه ($2\pi fCV^2$) : وكذلك تكون $V_S > V_R$ خاصة لحمل ذي عامل قدرة متأخرة . في الحالات المتطرفة قد يكون من الضروري للخط ان يستورد الـ vars عند كلا نهايتيه (وهذا يعني ان الحمل المجهزيكون ذا عامل قدرة متقدم وذلك لتقليل هبوط الفولتية . وعلاوة على ذلك يجب الايفاء بمتطلبات المستهلكين من القدرة المتفاعلة vars أيضاً) .

في اوقات الحمل الخفيف يقوم الخط بتوليد الـ vars واذا زادت هذه عن حاجة المستهلكين فان الـ vars الفائضة يجب ان تمتص وذلك بتشغيل المولدات باثارة قليلة (دون الاثارة الاعتيادية) . هناك أيضاً ميل الفولتية المنظومة بان ترتفع بحيث تكون ($V_R > V_S$) . وقد تسهل هذه المشكلة باخراج عدد من الخطوط عن الخدمة وبتقليل فولتية الشبكة الكبرى نفسها .

عندما يكون الحمل المربوط في نهاية استلام خط معين معادلاً لذلك الحمل المأخوذ من قبل الممانعة المميزة للخط ، Z_c . يقال ان الخط يشتغل بحمله الطبيعي . وقد تمت الاشارة في الفقرة 1.6 الى أنه في حالة الحمل الطبيعي تكون الـ vars الممتصة من قبل محاثة التوالي مساوية لتلك المتولدة من قبل سعة التوازي . وكذلك تكون $V_S \simeq V_R$.

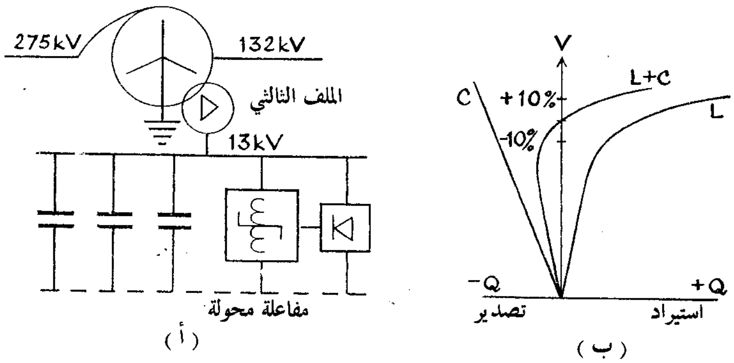
يتم الحصول على القدرة المتفاعلة اعتيادياً من المولدات المربوطة الى المنظومة . وهذه المولدات لها عوامل قدرة مقننة تتراوح ما بين 0·8 الى 0·9 متأخرة . خلال الحمل الاعظم على الشبكه حينما تكون المولدات محملة بقدرتها المقننة تقريباً يكون هناك حد للـ vars الذي يمكن ان تولده هذه المولدات . وخلال الحمل الادنى على الشبكة وعندما تكون المولدات باثارة واطئةلكنها تشتغل بقدرتها المقننة تقريباً . (بسبب كون قسم قليل منها يكون في حالة اشتغال) فان هناك حداً للـ vars الذي يمكن لهذه المولدات ان تمتصه حتى لا تزيد زاويةالحمل لهم (زاوية الدوار) على حوالي 75° .

لهذه الاسباب فانه من الضروري في بعض الاحيان استخدام اجهزة تسمى باجهزة تعويض القدرة المتفاعلة . لغرض توليد ال vars اوامتصاصها . حيث انالمحاثة المربوطة على التوازي تمتص ال vars بينما تولد المتسعة المربوطة على التوازي هذه ال vars . كذلك فان المكائن التزامنية المصممة خصيصا يمكنها ان تولد ال اوتمتصها اذا كانت في حالة الاثارة المفرطة اودون الاثارة . ولهذا يطلق عليها المعوضات التزامنية (متسعات اومعدلات طور) . ومما يرغب فيه هو ان تكون هذه المعوضات متنقلة . حيث ان موقعها الامثل قد يكون معرضا للتبديل من مكان لاخر تبعا لتغير مواقع الحمل وانماطه في المنظومة .

في المناقشة التي تاتي . سوف يشار الى جهاز التعويض من حيث كونه سريعا ام بطيئا . وللسيطرة على فولتية المنظومة خلال تغيرات الحمل الطبيعية فيكفي ان نتمكن من تشغيل اجهزة التعويض خلال بضع دقائق . مثلا بمقدار الزمن اللازم لتشغيل مآخذ المنظومة يجب ان يكون اشتغال اجهزة التعويض لحظياً وذاتياً تقريباً لضمان استقرارية المنظومة (راجع الجزء الثاني من هذا الكتاب) . وكذلك المحافظة على فولتية المنظومةلتي تميل الى الانخفاض بعد عزل الخطوط التي تعرضت للعطل وعندما تكون الشبكة الكبرى ثقيلة التحميل .

1.5.1 التعويض الستاتيكي STATIC COMPENSATION

يبين الشكل 1.21 جهاز تعويض ستاتيكي باستخدام محاثة ومتسعة مربوطتين على التوازي . يربط هذا الجهاز في الغالب عند نهاية الاستلام للخط وفي ملف الثالثي المربوط على شكل مثلثي في المحول . تستخدم المتسعات عندما يكون الطلب على الحمل شديدا . اذا كانت اقلدة هذه المجاميع يدوية فان السيطرة تكون بطيئة . خلال الحمل الاعظم للمنظومة . وحين تتعرض فولتية المنظومة للانخفاض . فان خرج الفولت امبيرات المتفاعلة لهذه المتسعات يكون أدنى مايمكن . وهذا يجعل المعضلة اسوأ . اما المحاثة التي تستخدم عندما يكون الحمل على المنظومة واطئا فيمكن ان تكون من نوع خاوي القلب . او من نوع قلب ذي فجوة . مثل المفاعل المتشبع او المفاعلة المحولة . النوع ذوالقلب الخاوي يكون خطيا ويستخدم للتقنيات والفولتيات الكبيرة (مثلا 100 MVA عند 400 ك . ف) .

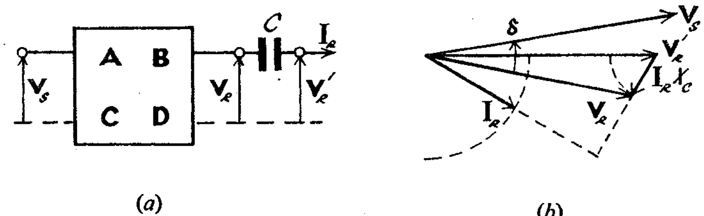


الشكل 1.21 تعويض القدرة المتفاعلة الستاتيكي

تصمم الانواع ذات القلوب الفجوية بحيث تكون خطية لحد فولتية قد تصل الى 1·3 بنسبة الوحدة . كلا النوعين هذين سوف يمتص ال vars بمعدل يتناسب مع مربع فولتية الطرف (لمفاعلة معلومة) . فللسيطرة البطيئة يمكـن تزويد الملف المفاعل بمأخذ تغيير او تركيبه على محول مساعد (وهذا الاخير سوف يزيد من كلفة النصب والتشغيل للمشروع) . عوضا عن ذلك قد يستخدم المشروع محولا مساعدا بمأخذ متغير ومربوط على شكل نجمي يمكن تنظيم الفولتية فيه نزولا الى الصفرلغرض تغذية متسعة ثابتة او محاث ثابت عن طريق فاصل اختبار ذي طريقين يشتغل في حالة اللاحمل فقط . هذا المشروع يكون رخيصا نسبيا وبسيطا ولايحتاج الى ادامة كثيرة .

بالامكان استخدام ملف مفاعل متشبع ذي مأخذ متغير يتشبع بفولتيات مختارة ضمن المدى ± 10 % من الفولتية المقننة . عندما يتشبع هذا الملف المفاعل فان ال vars الممتصة من قبله تتغير بسرعة لتغيرات قليلة بالفولتية . وتستخدم هذه المفاعلات على التوازي مع متسعات . تكون خواص الفولتية / ال vars المصدرة لمتسعة ما خطا مستقيما يمر بنقطة الاصل ، وتكون خواص الفولتية / ال vars المستورده لملف مفاعل متشبع مشابهـة لمنحنى المغنطة للمحول الاعتيادي . وعند اشتغال المفاعلات المتشبعة والمتسعات على التوازي فتكون الخواص ، عند ازدياد الفولتية ، مشابهة في البداية لتلك التي تكون لمتسعة وبعدها تتأرجح نحو خواص ملف المفاعل المتشبع عند تغير الفولتية مابين 90 الى 110 % من قيمتها الاسمية . لذا فـــان الجهاز يقوم بتصدير القدرة المتفاعلة عند الفولتية القليلة بينما يستورد هذه القدرة عند الفولتية العالية (الشكل 1.21 (ب)) .

بالامكان استخدام المفاعلة المحولة بحيث يتم الحصول على مصدر للتيار المستمر الخاص بملف السيطرة له من جهازتقويم ستاتيكـي (كما موضح في الشكل 1.21) .
وعندما تستخدم هذه المفاعلة على التوازي مع المتسعات تكون خواص هذه المجموعة مشابهة لخواص الملف المفاعل المتشبع ولكن السيطرة على هذه الخواص تكون ادق واسرع . ان معدات المفاعلة المحولة هذه تكون غالية الثمن ولاتستخدم الا عندما تكون السيطرة السريعة ضرورية لضمان استقرارية المنظومة .



الشكل 1.22. متسعة التوالي (I_R ثابت عامل القدرة متغير) .

ان تجهيز القدرة الهائلة للمناطق المعمورة الواسعة يكون في الغالب بوساطة قابلوات ارضية (بحدود 20 كم طول) وتعمل هذه القابلوات بفولتية 132 ك . ف فاعلي . لهذه القابلوات متسعات كبيرة تعتبر مصدرا للقدرة المتفاعلة حتى في حالات نقلها تيارا مقننا (انظر الفقرة 1.6) . يمتص هذه القدرة المتفاعلة vars بوساطة محاثات توازمربوطة على مسافات يكون التباعد بينهابضع كيلومترات على طول القابلو.

مع ان متسعات التوالي المستخدمة ضمن هذا المضمار لاتستعمل في شبكة كهرباء بريطانيا الا انه من المفيد الاشارة اليها بكونها تربط على التوالي مع الخط . تولد متسعات التعويض هذه قدرة متفاعلة vars تتناسب مع مربع التيار المار بها . استخدامها الاساسي لتقليل ممانعة التوالي للخط وذلك بحذف حوالي 50 ٪ من قيمة محاثة التوالي للخط لكي يرتفع حد القدرة (المشار اليه في الفقرة 1.2.3) وبذلك تتحسن استقرارية المنظومة (انظر الجزء الثاني من هذا الكتاب) ؛ ليس هناك خطوط في الشبكة الكبرى لبريطانيا من الطول بحيث تبرر استخدام هذه المتسعات ان تاثير متسعة التوالي على فولتية المنظومة مبين في الشكل 1.22 . فلحمل ذي عامل قدرة

متأخر $V'_R > V_R$ يكون هبوط الفولتية V_S و V'_R هو اقل من هبوط الفولتية بين V_S و V_R . ولكن هناك مشكلة بالنسبة لمتسعات التوالي هذه هي انها عندما تحمل هذه المتسعات تيار عطل فان الفولتية التي تكون عبرها تتعدى عموما الفولتية المقننة للمتسعة نفسها. عليه فان متسعات التوالي يربط معها على التوازي فجوات شرارة ، توضع لتمرير الشرر العرضي عندما يكون تيار العطل معادلا لثلاثة امثال التيار المقنن لهذه المتسعة ، وتربط مع فجوات الشرارة هذه وعلى التوالي مرحل تغلق قاطع دورة يكون مفتوحاً في الوضع الطبيعي ومربوطا على التوازي مع المتسعة . بدلا من ذلك قد تكون فجوة الشرارة من النوع المنطفيء ذاتيا عندما تنخفض الفولتية عبر المتسعة الى قيمة امينة .

1.5.2 المعوضات التزامنية : SYNCHRONOUS COMPENSATORS

تكون المعوضات التزامنية اساساً عبارة عن محركات تزامنية بدون خرج ميكانيكي . ويكون تصميمها عادة باقطاب بارزة (6 او 8 اقطاب) وبتقنين اقصاه حوالي 60 MVA ، 13 ك . ف (وقد تربط الى المنظومات التي لها فولتيات اعلى بوساطة محولات) . وهناك طرق متعددة لبدء تشغيل هذه المعوضات منها : تقليل الفولتية باستخدام مغير المأخذ على المحول وكذلك باستخدام ملف قفصي على أوجه الاقطاب أو باستعمال محرك مساعد وقد يكون هذا محركا حثيا ذا دوار قفصي او ملفوف او يكون محركا تزامنياً – حثياً .

يكون تسلسل بدء التشغيل عادة تحت سيطرة ذاتية (او توماتيكية) . وتكون السيطرة على المعوضات في حالة اشتغاله ذاتية ايضا . يتم تنظيم الاثارة ذاتيا لتعطي اما فولتية طرف ثابتة او قدرة متفاعلة vars ثابتة وتخضع هذه لحدود الاثارة المفرطة او دون الاثارة (لمنع الاشتغال غير المستقر) . اما طرق السيطرة والحصول على منظومة التيار المستمر لملف الاثارة في المعوضات التزامنية فتكون مشابهة لتلك التي تستخدم في المولدات التزامنية الاعتيادية (انظر الفقرة 7.9) . وتكون السيطرة على المعوضات التزامنية سريعة ومستمرة من تصدير قدرة متفاعلة vars مقننة الى حوالي استيراد نصف القدرة . خلافا للاجهزة الستاتيكية الاخرى فان هذه الاجهزة

تقوم بدفع تيار الى المنظومة في حالة وقوع عطل (اي ترفع من مستوى العطل) . عليه فهي معرضة لان تصبح غير مستقرة وتحتاج الى صيانة عالية نسبيا . تتطلب الاحمال الكهربائية ، المتقلبة على الدوام وبسرعة ، مثل مصانع الصلب والافران الكهربائية ذات الشرارة ، اجهزة تعويض سريعة وذاتية توضع قريبة منها قدر الامكان . في حالة الخطوط العلوية المعلقة الطويلة جدا (لاتنطبق على المملكة المتحدة) تربط المعوضات التزامنية على التوازي مع الخط وعلى مسافات بحوالي 150 كيلو متر .

1.6 الحمل الطبيعـي : حمل ممانعة التمور

Natural Load: Surge Impedance Load

يقال عن خط ما انه يشتغل بحمله الطبيعي عندما تكون الممانعة المؤثرة للحمل المجهز مساوية للمانعة المميزة اوممانعة التمور للخط ، اي ان $\mathbf{V}_R/\mathbf{I}_R = \mathbf{Z}_R = \mathbf{Z}_c$.

يتم تبسيط التحليلات الاتية بفرض ان الخط هوعديم الفقد (انظر الفقرة 1.3.8) . وعليه فانه لخط عديم الفقد . تكون ممانعته المميزة عبارة عن مقاومة صافية ويؤكد هذا باستخدام Z_c بدلا من $\mathbf{Z}_c$ وعندما تكون $\alpha = 0$, $\gamma = j\beta$ تصبح بذلك المعادلتان [1.28ج] . و [1.28د] كالاتي

$$\sinh(j\beta l) = j\sin\beta l \qquad [1.75أ]$$
$$\cosh(j\beta l) = \cos\beta l. \qquad [1.75ب]$$

بتعويض هذه القيم في [1.28أ] و [1.28ب] , ينتج

$$\mathbf{V}_S = (\cos\beta l)\mathbf{V}_R + (j\,Z_c\sin\beta l)\mathbf{I}_R \qquad [1.76أ]$$
$$\mathbf{I}_S = \left(\frac{j\sin\beta l}{Z_c}\right)\mathbf{V}_R + (\cos\beta l)\mathbf{I}_R. \qquad [1.76ب]$$

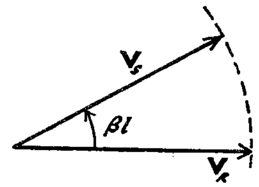
ان الكميات التي بين الاقواس هي الثوابت **A, B, C D** للخط عديم الفقد : و β في هذا المضمار هي معامل تغير الطور وليست زاوية الطور **B** . وباعتبار l متغيرا ، تعطي المعادلة [1.76] الفولتية و التيار عند اية نقطة على مسافة l من نهاية الاستلام .

اذا كان الخط عديم الفقد يشتغل عندحمله الطبيعي فان $\mathbf{V}_R = Z_c\mathbf{I}_R$ وتقلص بذلك المعادلة [1.76] الى

$$\mathbf{V}_S = \mathbf{V}_R(\cos\beta l + \mathrm{j}\sin\beta l) = \mathbf{V}_R\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta l} = \mathbf{V}_R\underline{/\beta l} \qquad [1.77\text{أ}]$$
$$\mathbf{I}_S = \mathbf{I}_R(\cos\beta l + \mathrm{j}\sin\beta l) = \mathbf{I}_R\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\beta l} = \mathbf{I}_R\underline{/\beta l}. \qquad [1.77\text{ب}]$$

عليه تكون الفولتية ثابتة في المقدار عند جميع النقاط على طول الخط ولكن $\mathbf{V}_S$ تتقدم في الطور نسبة الى $\mathbf{V}_R$ بزاوية β درجة نصف قطرية لكل كيلو متر وهذه الملاحظة تطبق ايضا على التيار . اما ممانعة نقطة السوق (الدخل) عند اي نقطة على الخط فتساوي $Z_c = \mathbf{V}_R/\mathbf{I}_R$. لمسافة نقل تساوي طول الموجة $l = \lambda$ (حيث تكون طول الموجة $\lambda = 6000$ كم لتردد مقداره 50 هرتز)و $\beta\lambda = 2\pi$ درجة نصف قطرية فان فرق طور الفولتية والتيار يكون °360 (لطول خط $l =$ طول الموجة λ) ويتناسب فرق الطور هذا مع المسافات الاخرى فمثلا : °6 لكل 100 كم . ان المحل الهندسي للفولتية $\mathbf{V}_S$ هو قوس دائرة لها نصف ثابت يساوي V_R وهذا مبين في الشكل 1.23 اما المخطط الطوري للتيار فيشبه المخطط الطوري للفولتية ولكن بجعل $\mathbf{I}_S$ ، $\mathbf{I}_R$ عوضا عن $\mathbf{V}_S$ ، $\mathbf{V}_R$.

من المفيد مناقشة موضوع التحميل الطبيعي للخط على اسس نظام نسبة الوحـدة وذلك بجعل فولتيه الطور المقننة هي الفولتية الاساس وجعل قدرة الحمل الطبيعي عند الفولتية المقننة ، $P_N = V_R^2/Z_c$ ، هي القدرة الاساس . وبما ان I_R الخط يكون ثابتا عدديا على طول الخط كله . فعليه تكون القدرة المتفاعلة vars المتصة من قبل محاثة التوالي للخط بنظام نسبة الوحدة هي $I_R^2\omega L/P_N$ (حيث L هي المحاثة الكلية للخط) وهذا التعبير يمكن تقليصه الى βl درجة نصف قطرية . بالاسلوب نفسه تكون الـ vars الكلية بنسبة الوحدة المتولدة بوساطة الفولتية الثابتة عدديا عبر متسعة التوازي الكلية للخط تساوي ايضا الى βl درجة نصف قطرية . لذا فإنه لخط عديم الفقد يعمل عند الحمل الطبيعي تجهز الفولتية والتيار والقدرة في نهاية الارسال بدون اي تغير عند نهاية الاستلام (بغض النظر عن ازاحة الطور βl) .



الشكل 1.23. خط عديم الفقد عند الحمل الطبيعي

سوف نناقش الان اداء خط عديم الفقد عند اي حمل لايساوي حمله الطبيعي فاذا عبرنا عن اي حمل مجهز بصيغة نسبة الوحدة من الحمل الطبيعي فعلى الطالب ان يتحقق من ان [1.69] تقلص الى

$$P_R^2+(Q_R+\cot \beta l)^2 = V_S^2/\sin^2 \beta l \text{ per unit} \qquad [1.78]$$

وذلك بأعتبار أن فولتية نهاية الاستلام هي فولتية مقننة : حيث P_R و Q_R هما القدرة والـ vars على التعاقب المجهزة عند نهاية الحمل من الخط

افرض الان تجهيز حمل ذي عامل قدرة واحد ، عليه فان المعادلة [1.78] تقلص الى

$$V_S^2 = P_R^2 \sin^2 \beta l+\cos^2 \beta l \text{ per unit.} \qquad [1.79]$$

باستطاعة الطالب ان يستخدم [1.79] لخط طوله $\lambda / 12$ اي 500 كلم حيث $\beta l = 360°/12 = 30°$. وباخذ قيم متزايدة للقدرة P_R من الصفر وبتدرج مقداره 0.5 بنسبة الوحدة عليه ان يبين انه عندما تكون $P_R = 0$ ، تكون V_S حوالي 14 % اقل من الفولتية المقننة وايضا عندما تكون $P_R = 1.5$ بنسبة الوحدة ، فان V_S تكون حوالي 14 % اعلى من الفولتية المقننة .

عندما تكون $V_S = V_R = 1$ بنسبة الوحدة فمن الواضح ان المعادلة [1.78] تقلص الى

$$(Q_R+\cot \beta l)^2 = (1/\sin^2 \beta l)-P_R^2 \text{ per unit.} \qquad [1.80]$$

بما ان الجهة اليمنى من المعادلة [1.80] يجب ان تكون موجبة فان القيمة العظمى للقدرة P_R تعطى كالاتي اذا كانت $V_S = V_R$

$$P_{RM} = \sqrt{(1/\sin^2 \beta l)} \text{ بنسبة الوحدة} \qquad [1.81]$$

للخط الذي طوله 500 كم $P_{RM} = 2$ بنسبة الوحدة . وباخذ قيم لـ P_R من 0 الى 2 بنسبة الوحدة على الطالب ان يجد القيم المقابلة من Q_R

ولما كان للجذر التربيعي قيمتان محتملتان فان هناك حلان محتملان لهذه المسألة . ولكن اذا تأملنا الحالة عندما تكون $P_R = 1$ بنسبة الوحدة فعلى الطالب ان يختار مجموعة الحل الصحيح للناتج ويستنتج انه عندما تكون $P_R = 0$ فان $Q_R = 0{\cdot}27$ بنسبة الوحدة ، وعندما تكون $P_R = 2$ بنسبة الوحدة فان $Q_R = -1{\cdot}73$ بنسبة الوحدة وفي هذه الاخيرة يكون عامل القدرة للحمل المجهز متقدماً ومقداره 0·758 .

على الطالب ايضا ان يتعمق في تحليل خط بطول 50 كم ويستنتج ان الخطوط الطويلة جداً يمكن ان تشتغل باحمال تزيد قليلاً عن الاحمال الطبيعية فقط (وذلك ضمن تحديدات تقنية واقتصادية معقولة ، على سبيل المثال هبوط الفولتية وكلفة اجهزة تعويض القدرة المتفاعلة) . بينما باستطاعة الخطوط القصيرة ان تشتغل باحمال تتعدى قيمها مرات عديدة للحمل الطبيعي . ان أطول خط في منظومة الشبكة الكبرى لبريطانيا هو أقل من 320 كم مسار طولي : مع الأخذ بنظر الاعتبار بصورة كبيرة الهبوط في الفولتية وكلفة معدات تعويض القدرة المتفاعلة المنصوبة والمشكلة الكبرى بالنسبة لمثل هذه الخطوط تمكن في أستقرارية منظومتي القدرة المترابطة فيما بينها (انظر الجزء الثاني من هذا الكتاب) .

من الواضح ان الحمل الطبيعي P_N لخط معين يشتغل بفولتية مقننة معلومة يكون ثابتاً . عليه فان الخط الطويل المطلوب اشتغاله بحمل طبيعي لايحتاج الى أية اجهزة تعويض للقدرة المتفاعلة واي انحراف عن مقدار هذا الحمل يسبب تغيراً كبيراً في الفولتية .

للقابلوات الارضية ، تكون الممانعة المميزة قليلة جداً بحيث ان الحمل الطبيعي يتعدى بصورة كبيرة الحمل المقنن للقابلو . لهذا السبب فان القابلو يكون بصورة عامة مصدراً للقدرة المتفاعلة vars المتأخرة .

المراجع

BRITISH INSULATED CALLENDER'S CABLES LTD. 1965. *The application of power capacitors*. London.

COX, E. H. 'Overhead-line practice', 1976, *Proc. I.E.E.*, **122**, IOR, pp 1009–1017.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS. 1964. *Abnormal loads on power systems*. I.E.E. Conference Report Series No. 8, London.

INSTITUTION OF ELECTRICAL ENGINEERS. 1966. *Design criteria and equipment for transmission at 400 kV and higher voltages*. I.E.E. Conference publication No. 15, London.

LEWIS, W. E. & PRYCE, D. G. 1965. *The application of matrix theory to electrical engineering*. Spon, London.

MIDDLETON, A. G., SEALY, T. & HOLDER, F. E., 'Control communications and protection for the El Chocon–Buenos Aires 500 kV transmission system', 1975, *Proc. I.E.E.*, **122**, pp 1405–1415.

MORTON, A. H. 1966. *Advanced electrical engineering*. Pitman, London.

OAKESHOTT, D. F. & WHITTINGTON, H. W. 'Impulse performance of a tower for transmission at 1300 kV', 1974, *Proc. I.E.E.*, **121**, pp 191–196.

STEVENSON, W. D. 1962. *Elements of power system analysis*. McGraw-Hill, New York.

TROPPER, A. M. 1962. *Matrix theory for electrical engineering students*. Harrap, London.

WADDICOR, H. 1964. *The principles of electric power transmission*. Chapman and Hall, London.

WESTINGHOUSE (Ed). 1964. *Electrical transmission and distribution reference book*. Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, U.S.A.

WOOD, A. B., TAYLOR, J. V. & LIPTROT, F. J. 'Design, testing and construction of the overhead lines for the El Chocon to Buenos Aires transmission system', 1976, *Proc. I.E.E.*, **123**, pp 51–59.

I.E.E. Conference Publication No. 107, 1974, 'High-voltage d.c. and/or a.c. power transmission.'

مسائل

1 . موزع حلقي ثلاثي الطور ABC فولتيته 3·3 ك.ف مغذى عند A بفولتية مقننة . الاحمال المتوازنة عند B ، C هي 200 أمبير بعامل قدرة متأخر 0·707 و 200 أمبير بعامل قدرة متأخر 0·8 على التعاقب . وعاملا القدرة هذان معبر عنهما نسبة الى الفولتية عند A . ممانعات الاجزاء الثلاثة AB و BC و CA هي $1+j\,1$ و $1{\cdot}5+j\,0{\cdot}867$ و $0{\cdot}867+j\,1{\cdot}5$ أوم / طور على التعاقب . احسب التيارات $\mathbf{I}_{AB}$ و $\mathbf{I}_{BC}$ وكذلك $\mathbf{I}_{AC}$ واحسب ايضاً الفولتية عند C .

(L.C.T.) (الجواب : $213\underline{/-47{\cdot}25^\circ}$ و $15{\cdot}5\underline{/-79{\cdot}17^\circ}$ و $189\underline{/-33{\cdot}7^\circ}$A أمبير ، 2·74 ك . ف) .

2 . مولدان A و B ثلاثيا الطور يمكن اعتبار ممانعتيهما الداخليتين مهملتين . فولتية الطرف لهما 11 ك.ف ويسبق A المولد B بزاوية طورية قدرها 14° . كـــلا المولدين يغذيان محطة ثانوية C عن طريق حلقة ABC ممانعات أجزائهما هي $2+j\,4$ و $1+j\,2$ و $1+j\,3$ أوم / طور على التعاقب للاجزاء AB ، BC و CA . اذا سرى تيار حمل مفرط متماثل ثلاثي الطور مقداره $1{\cdot}5-j\,2$ كيلوأمبير من المحطة C . جد القدرة المجهزة من المولد عند B ومقدار الفقد في القدرة في الجزء AB من الحلقة .

(I.E.E.) (الجواب 13·1 و MW0·72) .

3 . مصدر ثلاثي الطور رباعي السلك ونجمي الربط له ممانعة داخلية تساوي صفراً . فولتية طور متماثلة مقدارها 230 فولت وتسلسل طوري ABC . ربط هذا المصدر . عن طريق قابلو رباعي القلب . مقاومة قلب كل خط منه هي 0·5 أوم ومقاومة قلب محايدة هي 1 أوم . الى حمل رباعي السلك وكما يلي : ($3{\cdot}5+j\,3$) أوم الى A ، ($4{\cdot}5+j\,5$) أوم الى B و 12·5 أوم الى C . وربـــط محايد المصدر N الى نقطة التفرع النجمي S . احسب مقدار التيار في الخط A
(L.C.T.) (الجواب : 46·4 أمبير)

4 . أخذت المعلومات التالية من جداول تتعلق بخط طوله 40 كم وبفولتية 33 ك.ف : ممانعة التوالي $0{\cdot}125+j\,0{\cdot}295$ أوم / طور – كم . التيار المقنن 400 أمبير . حمل

نهاية الاستلام لهبوط فولتية قدرة 10 % هو 18 MW عند عامل قدرة واحد و 7·75 MW عند معامل قدرة متأخر 0·8 . وحد القدرة عندما يكون $V_S = V_R$ هو 52 MW ارسم مخطط اداء نهاية الاستلام (V_R = 33 ك.ف) لهذا الخط ، (أ) بمقياس الفولتية (ب) بمقياس الفولت أمبير وتحقق من المعلومات المعطاة في السؤال . اذا جهز الخط تياراً مقناً عند عامل قدرة متأخر 0·8 فما هي النسبة المئوية لهبوط الفولتية ؟ (L.C.T)
(الجواب : 7·9 %)

5 . خط مزدوج عيار 2·6 سم^2 بفولتية 275 ك.ف (معامل على انه خط قصير) له ممانعة توال مقدارها 0·03 + j 0·265 أوم/ طور – كم ، تقنينه في الطقس البارد 1600 امبير (760 ميكا فولت امبير عند 275 ك.ف) وله مسار طوله 140 كم . ارسم مخطط اداء نهاية الاستلام لفولتية استلام V_R تساوي 275 ك.ف واحسب منه (أ) التحميل لاجهزة تعويض المفاعلة عند نهاية الاستلام والتى سوف تحدد من هبوط فولتية الخط الى 10 % عندما يكون الحمل المجهز للمستهلكين هو 600 MW عند عامل قدرة متاخر 0·9 (ب) الحمل المجهز بالميكا فولت أمبير عند عامل قدرة متأخر مقداره 0·8 لانتظام فولتية قدرة 10 % (بدون اي اجهزة تعويض) وكذلك (ج) التحميل بالميكا فولت امبير المتفاعلة MVAr لاجهزة تعويض المفاعلة لابقاء هبوط الفولتية عند نسبة 10 % عندما يكون الحمل المجهز صفرا .

(L.C.T.) (الجواب : 221 MVAr مصدره 207 MVAr, 286 MVA مستوردة) .

6 . مجموعتان A و B من قضبان التوزيع ذواتا فولتية 132 ك.ف مربوطتان بعضهما ببعض بخطين متماثلين على التوازي مفاعلة كل منهما 20 اوم ومقاومة كل منهما مهملة . الدخل الكلي عند A هو 200 MVA , 132 ك.ف . وعامل قدرة متأخر 0·8 . فاذا تم حقن فولتية (ق.د.ك) معززة في احدى الدوائر عند A وفي الطور نفسه مع الفولتية وبمقدار 5 % . وتم التعزيز من A الى ناحية B فاحسب القدرة والقدرة المتفاعلة اللتين تم تغذيتهما الى الدائرة المعززة وغير المعززة . افرض ان الدخل لايتغير .

(L.C.T.) (الجواب $80\cdot1+j\,38\cdot3$, $80\cdot0+j\,82\cdot0$ MVA)

7. خطان A و B ثلاثيا الطور يشتغلان على التوازي ، مفاعلتاهما 0·7 و 1·3 اوم/ طور على التعاقب ومقاومتاهما مهملتان . الدخل الكلي هو 30 MVA ، بعامل قدرة تتأخر 0·8 . وفولتية ١١ ك . ف ، ويمكن الفرض ان هذا الدخل يبقى ثابتا . جد الحمل الذي يحمله كل خط بصيغة $(P+j\,Q)$ MVA . الان اذا تم حقن ق . د . ك في الخط B وعند نهاية الارسال للتعزيز باتجاه نهاية الاستلام ، واذا اريد التعبير عن هذه الفولتية بالفولت الى المحايد وبأخذ فولتية نهاية الارسال مرجعا . احسب ال ق . د . ك المعززة العمودية التي سوف تجعل الخطين يحملان قدرة متساوية . احسب الق . د . ك المعززة التي تجعل الخطين يحملان تيارين متماثلين . وللحالات الثلاث هذه ، احسب ال vars الكلية الممتصة من قبل المنظومة .

(L.C.T.) (الجواب $15\cdot62+j\,11\cdot72$, $8\cdot38+j\,6\cdot28$ MVA, 380 فولتا ، +286 $j\,382 = 477$ فولت $1\cdot131$, $1\cdot202$, $1\cdot25$ MVAr)

8. مولد A ١١ . ك . ف يجهز محطتي ثانويتين B و C عن طريق حلقة ABC . ممانعة القطاعات AB و BC و CA هي $0\cdot5+j\,1$ ، $0\cdot75+j\,1\cdot25$ و $0\cdot5+j\,0\cdot75$ اوم / طور على التعاقب . الحمل المأخوذ من B هو 600 امبير عند عامل قدرة متأخر 0·8 . والمأخوذ من C هو 480 امبير عند عامل قدرة متأخر 0·9 . عاملا القدرة معبر عنهما نسبة الى الفولتية عند A . احسب مقدار التيار I_{AB} . نصب الان معزز في A وفي الخط AB للتعزيز من A الى B فاذا اعطى المعزز تعزيزا في الطور نفسه مقداره 5 % من الفولتية المقننة احسب I_{AB} . ما قيمة الفولتية المعززة . بوصفها نسبة مئوية من الفولتية المقننة والتي تقلل التيار I_{BC} الى الصفر؟

(L.C.T.) (الجواب $426-j\,314$, $380-j\,235$ امبير . $3\cdot55+j\,1\cdot28$ %)

9. ربطت مجموعتا قضبان توزيع ثلاثية الطور 11 . ك . ف لمحطتين ثانويتين منفصلتين R و S بدائرتين متوازيتين 1 , 2 كل دائرة تحتوي على محول 11/132 ك . ف وخط 132 ك . ف ومحول 132/11 ك . ف . المانعتان الكليتان للدائرتين . مع المحولين وخط النقل مسندتين الى فولتية 11 ك . ف هما $Z_1 = (0\cdot2+j\,0\cdot4)$ و $Z_2 = (0\cdot2+j\,0\cdot6)$ اوم / طور

(أ) اذا كان قضيب التوزيع S عند فولتية 11ك . ف ويرسل قدرة 30 MW بعامل قدرة 0·8 متقدم . فجد التيارات الاصلية في كل محول عند S .

(ب) اذا كان المحول عند S مجهزا بمآخذ على جهة 11 . ك ف . فما هي النسبة المئوية للمآخذ اللازمة لجعل كل ادارة تحمل كمية متساوية من القدرة المتفاعلة وما هي القدرة التي سوف ترسلها الدائرة رقم 2 .

(I.E.E.) (الجواب ∠115 , 814 امبير . 2·89+% (زيادة باللفات) و 11·92 MW)

10. حمل متوازن ثلاثي الطور مقداره 100 MVA بعامل قدرة متأخر 0·8 منقول من محطةثانوية بوساطة دائرتين على التوازي . وكل دائرة تحتوي على محـول / خـط نقـل / محول . المانعـة الـكلية لـكل دائـرة ولـكل طـور هـي $Z_a = (5+j\,20)$ % و $Z_b = (5+j\,10)$% مسندة الى 100 MVA

(أ) اذا كانت جميع المحولات لها نسبة لفات متساوية . فجد الاحمال الفردية المنقولةبوساطة كل دائرة في صيغة $MVA(P \pm j\,Q)$

(ب) ما هي النسبة المئوية لتغير المأخذ الضرورية على ثانوي احد محولي المحطتين الثانويتين لكي تنقل هاتان الدائرتان قدرتين MVA متساويتيـن عدديا ؟ وما مقدار الاحمال المنفردة في كل دائرة معبرا عنها بالصيغة $MVA\ (P \pm j\,Q)$

(I.E.E.) (الجواب $25+j\,2$; $MVA\,55+j\,35$; 5·77 % ; $30{\cdot}8+j\,42{\cdot}3$; $MVA\,49{\cdot}2+j\,17{\cdot}7$

11 . خط 132 ك.ف له ممانعة توال مقدارها $0{\cdot}125 + j\,0{\cdot}335$ اوم / طور كلم وطول مسارقدره 100 كم . لهبوط فولتية 10% من الفولتية المقننة . أحسب قدرة نهاية الأستلام اذا كان عامل القدرة (أ) واحدا (ب) 0·8 متأخر أحسب أيضاً حدقدرة الخط اذا كانت الفولتية عند كلا النهايتين مساوية للفولتية المقننة .

(L.C.T.) الجواب :110، 46و 318 ميكاواط)

12. خط قصير له مقاومة توال مهملة ومفاعلة توال مقدارها 16 أوم / طور الدخل الى الخـط هو20MW لـكل طور و 16 MVAr متأخر / طور . واذا كانت $V_R =$ (100+j 0) ك.ف . فأحسب V_S و I_S .

(I.E.E.) (الجواب 102·4+j 3·2 ك . ف / طور. 150 j -200 أمبير)

13. خط 132 ك.ف . له ممانعة توال قدرها 10+j 40 اوم / طور . والحمل المجهز هو200 MW بعامل قدرة متأخر 0·8 . اذا كانت الفولتيتان عند نهايتي الخط هما 132 ك. ف . فأحسب التحميل لمفاعلة أجهزة التعويض المطلوبة وكذلك زاويـــة الحمل .

(I.E.E.) (الجواب : 265 MVAr مصدره ، 31·77°)

14. دائرة نقل ثلاثية الطور تجهز600 MW الى نقطة حمل بعامل قدرة متأخر 0·98 . مفاعلة الدائرة عند تردد المصدر هي 21·83 أوم / طور أما مقاومتها فيمكـــن أهمالها .جد مقدار تجهيز القدرة المتفاعلةعند نهايةالأستلام اللازمةاذا أستوجب ابقاء الفولتية عند نهايتي الأرسال والأستلام عند قيمة 275 ك . ف .

(I.E.E.) (الجواب : 178 MVAr مصدرة)

15. دائرة نقل لها مفاعلة توال لـكل طور مقدارها 24 Ω محسوبة عند تردد المصدر . ومقاومة التوالي ومنسعة التوالي لهذة الدائرة مهملتان . فاذا كانت الفولتية عند نهاية الأستلام هي 132 ك. ف وفولتية نهاية الأرسال هي 140 ك. ف وذلك عندمـــا يكونمقدار التيارالمنقول هو 500 أمبير . فأحسب القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلـة المناظرتين المجهزتين عند نهاية الاستلام .

(I.E.E) (الجواب 49·7 MW , 1·54 MVAr متقدم)

16 . خط قصير66 ك. ف له ممانعة توال 0·125 + j 0·295 أوم / طور– كم وطول مساره 60 كم . ويعمل بفولتية 66 ك. ف . في كلا طرفيه وزاوية حمل مقدارها 10°. أحسب قدرة وعامل قدرة نهاية الأستلام لهذا الخط .

(L.C.T.) (الجواب : 34·9 MW , 0·877 متقدم)

17. خط قصير له ممانعة توال مقدارها $10+j\ 30$ اوم / طور . ومقدار فولتية الارسال والاستلام 140 , 120 ك . ف على التعاقب . وزاوية حمل مقدارها $5°$. احسب قدرة وعامل قدرة نهاية الاستلام .

(L.C.T.) (الجواب $67·8$ MW , $0·783$ متأخر)

18. خط ثلاثي الطور له ممانعة توال كمية مقدارها $300/78°$ اوم / طور ومسامحة التوازي الكلية مقدارها $24 \times 10^{-4}/90°$ سمنس / طور . الفولتية عند نهاية الاستلام بدون وجود حمل عليها هي 220 ك . ف . ربط حمل 100 MW وبعامل قدرة واحد عند نقطة منتصف الخط . احسب فولتية نهاية الارسال ، باستعمال تمثيل Π- الاسمي .

(I.E.E.) الجواب $316·5$ ك . ف)

19. خط نقل رابط ثلاثي الطور ، 50 هرتز . طوله 48 كم يشتغل بفولتية 66 ك . ف (خط) في كلتا نهايتيه . ومقاومة كل موصل هي $0·181$ اوم / كم ومحاثة الموصل هي $1·16$ ملي هنري / كم والمتسعة مهملة . استخدمت محولات معززة للطور نفسه ومتعامدة معه عنهد نهاية الارسال للسيطرة على انسياب القدرة . اهمل مفاقيد المحولات . احسب (بطريقة الرسم اوبغيرها) القدرة المنقولة وقدرة نهاية الاستلام وكذلك تيار الخط وفي الحالات التالية :
تعزيز في الطور نفسه مقداره $0·06$ بنسبة الوحدة وتعزيز عمودي متقدم مقداره $0·08$ بنسبة الوحدة من فولتية نهاية الارسال ، وفولتية قضيب التوزيع لنهاية الارسال تتقدم على فولتية نهاية الاستلام المناظرة بزاوية $10°$.

(جامعة لندن) (الجواب : $62·7$ MW, $55·6$ MW, 520 امبير)

20. مغذيان متوازيان لهما الثوابت الاتية :

الثوابت	المغذي I	المغذي II
A = D	$0·816/4·35°$	$0·871/2·5°$
B	$227·2/72·3°\ \Omega$:	$196/73°\ \Omega$
C	$15·7 \times 10^{-4}/91·4°$ سيمنس	$12·94 \times 10^{-4}/92·35°$ سيمنس

احسب ممانعة نهاية الارسال للمنظومة عندما تكون نهاية الاستلام في حالة الدائرة المفتوحة . وجد مقدار فولتية نهاية الارسال اذا كانت فولتية نهاية الاستلام هي 132 ك . ف

(جامعة ليدز) (الجواب : $295\underline{/-86° 26'}$ اوم، 111·8 ك . ف)

21. خط نقل قصير ثلاثي الطور يجهز قدرة 1000 kVA عند 10ك . ف وبعامل قدرة متأخر 0·8 الى حمل متوازن . مقدار مقاومة كل موصل هي 4 اوم ومفاعلته 6 اوم . احسب الفولتية عند منتصف الخط .

ربط الان حمل متوازن نجمي الربط مقدار مقاومته 100 اوم / طور ومفاعلته الحثية 200 اوم / لكل طور مربوطتين على التوالي عند منتصف الخط وبفرض ان الفولتية عند جهة المولد تتغير بحيث تبقى على فولتية منتصف الخط ثابته . احسب التيار الجديد وعامل قدرته عند جهة المولد من الخط .

(جامعة لندن) (الجواب : 320 10 فولت، 82·6 امبير ، 0·69 متاخر)

22. خط نقل ثلاثي الطور له مقاومة / طور مقدارها 10 اوم ومفاعلة حثية مقدارها 30 اوم . احسب اعظم قدرة يمكن ان تنقل عندما تكون فولتية نهاية الاستلام وفولتية نهاية الارسال هما 132 ك . ف و135 ك . ف على التعاقب .

(جامعة ليدز) (الجواب : 390 MW)

23. خط نقل ثلاثي الطور يجهز قدرة 1000 kW بفولتية 11ك . ف وبعامل قدرة متاخر 0·8 . مقاومة الخط هي 4 اوم ومفاعلته 6 اوم / موصل . احسب الفولتية عند نهاية الارسال للخط اذا ابقي على فولتية الحمل ثابتة عندما ادى توصيل حمل اضافي الى زيادة تيار الخط بمقدار 50 أمبير اوارتفاع عامل القدرة المتاخر الى 0·9 . احسب ايضا مقاومة ومفاعلة التوالي المكافئة للحمل المضاف.

(جامعة لندن) (الجواب 12 200 فولت ، 116·5+j 25·7 اوم) .

24. خطوط نقل ثلاثية الطور مربوطة على التوازي تجهز قدرة 1000 kVA عند فولتية 6·6 ك . ف وعامل قدرة متأخر 0·8 .

الخط A ، المقاومة / موصل 1 اوم ، المفاعلة / موصل 0·4 اوم الخط B ، المقاومة / موصل 0·5 اوم : المفاعله على موصل 0·5 اوم
الخط C ، المقاومة / موصل 0·4 اوم : المفاعلة / موصل 0·6 اوم

احسب التيار المجهز بوساطة الخط B وعلاقة طوره بالنسبة لتيار الحمل الكلـــي .

(جامعة لندن) (الجواب 34·1 امبير يتأخر بزاوية '31 °1)

25. خط نقل ثلاثي الطور له مقاومة 4 اوم ومفاعلة حثية قدرها 12 اوم / موصل . يجهز قدرة 5000 kVA بعامل قدرة متأخر 0·8 وفولتية الخط عند منتصف خط النقل هي 30 ك . ف . احسب الفولتية عند طرف الحمل وعامل القدوة عند منتصف الطريق في الخط .

(الجواب : 200 29 فولت، 0·79 متأخر)

26. خط نقل ثلاثي الطور له مقاومة مقدارها 4 اوم ومفاعلة حثية مقدارها 6 اوم لكل موصل . ربط اليه حمل متوازن فأخذ 2000 kVA بعامل قدرة متأخر 0·8 . فاذا كانت فولتية الخط عند طرف الحمل من خط النقل هي 30 ك . ف . فاحسب المقاومة والمفاعلة الحثية المكافئتين للحمل الى المحايد

اضيف حمل جديد متوازن له مقاومة توالِ مقدارها 250 اوم ومفاعلة حثية ، مقدارها 500 اوم (الى المحايد) فاذا كانت الفولتية عند طرف الحمل من الخط هي 30 ك . ف . فاحسب لهذه الظروف : (أ) تيار الخط (ب) الفولتية عنـــد طرف المولد من الخط .

(الجواب : 360 أوم ، 270 أوم ، 68 أمبير ، 30·8 ك . ف)

27. الثوابت : لخط نقل هي $A = 0{\cdot}90\underline{/2^\circ}$ و $B = 140\underline{/70^\circ}$ اوم / طور فولتية الخط عند نهاية الاستلام هي 132 ك . ف والحمل هو 60 MVA عند عامل قدرة

متأخر 0·8 . احسب فولتية الخط لنهاية الارسال وكذلك زاوية الحمل .

(I.E.E.) (الجواب : 176·5 ك . ف ، °12·8) .

28. خط طويل فولتيته 132 ك . ف له ثوابت مقدارها $A = 0{\cdot}98/3^\circ$ وكذلك $B = 110/75^\circ$ أوم / طور . ارسم مخطط اداء لنهاية الاستلام لنوبية $V_R = 132$ ك.ف وبعد ذلك جد حد القدرة للخط، وتحميل أجهزة تعويض المفاعلة عند طرف الحمل لهبوط فولتية مقداره صفراً لكلا الحالتين . الحمل المجهز هو 50 MVA ، بعامل قدرة متأخر 0·8 و 132 ك . ف .

(L.C.T.) (الجواب : 112 MW ، 45·6 MVAr مصدرة)

29. خط ثلاثي الطور 132 ك . ف له ثوابت $A = 0{\cdot}98/3^\circ$ و $B = 110/75^\circ$. وحمل نهاية الاستلام هو 50 MVA بعامل قدرة متأخر 0·8 وفولتية 132 ك . ف . احسب فولتية نهاية الارسال والتيار وعامل القدرة وكذلك صافي القدرة المتفاعلة vars الممتصة من قبل الخط . واحسب ايضاً تحميل اجهزة تعويض المفاعلة (عبر الحمل) المطلوب لغرض تقليل فولتية نهاية الارسال الى 140 ك . ف .

(L.C.T.) (الجواب : ك . ف ، 254 أمبير ، 0·894 متأخر .
2·8 MVAr ، 35·5 MVAr مصدرة)

30. خط نقل ثلاثي الطور 275 ك . ف له معالم $A = 0{\cdot}95/3^\circ$ ، $B = 80/75^\circ$ أوم / طور . لفولتية نهاية استلام مقدارها 275 ك . ف :

(أ) احسب فولتية نهاية الارسال اللازمة اذا كان حمل نهاية الاستلام هو 250 MW عند عامل قدرة متأخر 0·85 . (ب) احسب القدرة المتفاعلة الاضافية في نهاية الاستلام اذا كانت فولتية نهاية الارسال 300 ك . ف والحمل هو 400 MVA عند عامل قدرة متأخر 0·9

(L.C.T.) (الجواب : 331 ك . ف ، 222 MVAr مصدرة)

31. خط ثلاثي الطور له ثوابت عامة $A = 0{\cdot}856/6{\cdot}72^\circ$ وكذلك $B = 101/81{\cdot}46^\circ$ أوم / طور . ما بين نهاية الاستلام للخط والحمل ربطت متسعة توالٍ مفاعلتها 50 أوم (واحدة على التوالي مع كل موصل) . فاذا كان الحمل المجهز هو 150 MW ، 220 ك . ف بعامل قدرة متأخر 0·8 . فاحسب فولتية نهاية الارسال

(I.E.E.) (الجواب : 236 ك . ف)

32. خط علوي معلق طويل متماثل . ثلاثي الطور مفتوح الدائرة عند طرف الحمل . اعطى المعلومات التالية خلال عملية الفحص (جميعها لكل طور نجمي . وللطور نفسه) : فولتية حمل $200/0^\circ$ ك . ف . فولتية ارسال $180/5^\circ$ ك ف

تيار ارسال °200/92 أمبير . احسب الثوابت A وB وC وD. احسب كذلك فولتية الدخل . والقدرة وعامل القدرة لحمل بفولتية 200 ك . ف لكل طور قدرة 40 MW لكل طور بعامل قدرة واحد .

(L.C.T.) (الجواب : °0·9/5 ، °248/53·2 أوم ، °1/92 ملي سيمنس ، °0·9/5 ، 216ك . ف ، 48·5 MW . 0·808 متقدم)

الفَصلُ الثاني

محاثة خط النقل

TRANSMISSION LINE INDUCTANCE

2.1 مقدمـــة

عندما يتغير الفيض المغناطيسي المرتبط مع اي دائرة كهربائية فستتولد ق . د . ك . في الدائرة تتناسب مع معدل تغير ترابط الفيض . ان الفيض المرتبط مع دائرة ما يمكن ايجاده في اي لحظة ، بصورة عامة ، باخذ تكامل كثافة الفيض الاعتيادية على اي سطح محدد بالموصلات المكونة للدائرة . ففي الحالات التي يمكن فيها تعريف عدد لفات الدائرة بوضوح من الممكن تمثيـــل ترابط الفيض ببساطة وذلك بجمع الفيض المرتبط مع كل لفة . من ناحية ثانية فان هناك حالات لايمكن فيها تعريف الفيض الرابط المؤثر بهذه الطريقة البسيطة مثال على ذلك عندما تنشأ كمية ترابط محسوسة من الفيض الذي يرتبط مع جزء من تيار الدائرة داخل الموصلات . من الملائم في هذه الحالة تجزئة جريان التيار الى عناصر كل منها يرتبط مع بعض من الفيض ومن ثم تجمع ترابطات الفيض التيار وكما سيبين في الفقرة 2.2.1 .

اذا كان هناك فيض لحظي مقداره ϕ Wb يرتبط بصورة كاملة مع عدد لفات مقداره N فان ترابط الفيض هو ϕN weber-turns, وال ق . د . ك اللحظية المحتثة في الدائرة الحاوية لهذه اللفات تكون $e = -\mathrm{d}(\phi N)/\mathrm{d}t$ volts, ولكن من المعتاد ان يكون عدد اللفات ثابتا ولذلك فان $e = -N(\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t)$. تكون ال ق . د . ك . اللحظية 1 volt اذا كان الفيض يتغير بمعدل 1 weber-turn/second في تلك اللحظة .

اشارة الناقص تشير الى ان الق . د . ك . في اتجاه وكأنها تحاول تدوير تيار يعاكس تغير الفيض الذي اوجده ، كما نص على ذلك قانون لنز Lenz's Law .

اذا كانت ϕN تتناسب طرديا مع التيار المحتث اللحظي في دائرة ذات عدد لفات N ، اي انه اذا لم يكن هناك تشبع للمواد الفيرومغناطيسية بحيث انه يكون للدائرة المغناطيسية مقاومة ثابتة ، فان ثابت التناسب يمكن كتابته على انه المحاثة L مقاسة بال henry وبذلك فان $\phi N = Li$. بناءً على ذلك تكون للدائرة محاثة ذاتية مقدارها 1 H اذا كان تغير تيار مقداره 1 A فيها يسبب تغيرا في الفيض الرابط مقداره 1 Wb turn . تبعا لذلك فان ال ق . ك . د . المحتثة بالحث الذاتي تكون $e = -\mathrm{d}(Li)/\mathrm{d}t$ volts واذا كانت L ثابتة فان $e = -L(\mathrm{d}i/\mathrm{d}t)$ volts.

عندما تحتوي الدائرة على مادة فيرومغناطيسية (كما في موصلات خطوط الالمنيوم ذات اللب الفولاذي (او . أ . ل . ف) بحيث ان الفيض لن يكون متناسبا مع التيار المغنط كالسابق فان المحاثة سوف لاتعرف بوصفها قيمة تزايدية $\mathrm{d}(\phi N)/\mathrm{d}i$ ولكنها تعرف بوصفها تغيرا في الفيض الرابط عند انعكاس اتجاه التيار مقسوما على تغيرالتيار. هذا التعريف بدلالة انعكاس التيار بدلا عن تقليل التيار الى الصفر يربط المحاثة المؤثرة مع ذروة كثافة الفيض وليس مع المغناطيسية المتبقية عندما يقلل التيار الى الصفر .

عندما يتغير التيار المغنط جيبيا مع الزمن عند تردد f Hz وله قيمة جذر متوسط تربيع $\mathbf{I}$ امبير فان الفيض الرابط سيكون جيبيا ايضا وله قيمة جذر متوسط تربيع (ج . م .ت) $\mathbf{\Phi}N$ = جذر معدل تربيع الـ ق . د . ك . المحتثة بالفولت $\mathbf{E} = \mathrm{j}\,\omega L\mathbf{I} = \mathrm{j}\,\omega\mathbf{\Phi}N$

حيث ان $\omega = 2\pi f$ rad/s و

$$L = (\Phi N/I). \qquad [2.1]$$

تمعن بعد ذلك في نمط توزيع المجال باستعمال قانون الدائرة المغناطيسية والذي ينص على ان تكامل الخط للقوة المغنطة $\mathbf{H}$ حول اي مسار مغلق يكون مساويا لمجموع التيار المرتبط مع المسار اي ان:-

$$\oint \mathbf{H}_{tx}\mathrm{d}x = \mathbf{I}N.$$

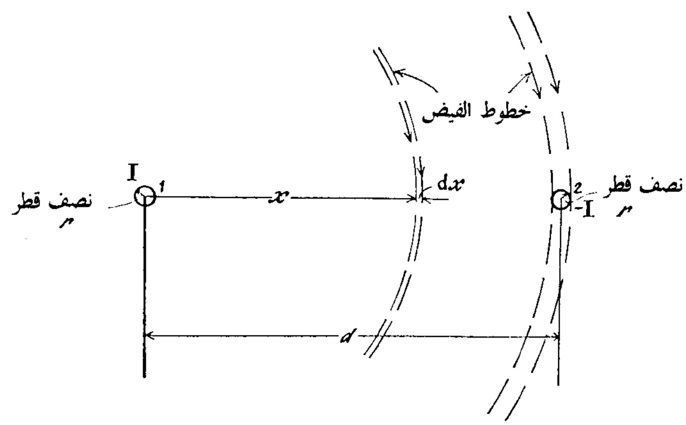
اذا اخذنا مسار فيض دائريا ذا نصف قطر x metres حول موصل طويل مفرد يقع بعيداً جدا عن الموصل المرجع وكل من الموصلين الاصلي والمرجع يحمل تيار ج.م.ت. منـ... I فان $2\pi x H_{tx} = I$. الرمز السفلي في H_{tx} يشير الى ان جذر متوسط ... x تكون مماسة عند كل النقاط حول المسار الدائري

$$H_{tx} = (I/2\pi x)$$

2.2 خط ذو سلكين Two-wire Line

سنتبصرفي المجال المغناطيسي المكون بوساطة كل موصل بصورة منفصلة من ناحية اسهامها في محاثة الدائرة وبما ان موصلات خط الطور الاحادي ستكون انصاف اقطار متساوية في الحقيقة فان كلا منها سيكون نصف محاثة الدائرة . شكل 2.1 يبيـــن المسارات الدائرية النموذجية التي ستتبعها خطوط الفيض بسبب مرور ج . م . ت تيـــار متناوب I في الموصل 1 . والتي تكون خارجية نسبة له . وباهمال التيار I– فـــي الموصل 2 مؤقتا .

ليس من الممكن اعتبار نصف قطر الموصل r صغيرا الى حد الاهمال بحيث ان التيار يجري في فتيله على طول محوره . (على أساس هذا الفرض فان الفيض المرتبط مع دائره متكونة من موصلين 1 , 2 بسبب التيار I في موصل 1 سيكون حسب المعادلة [2.2]



الشكل 2.1. خط ذو سلكين يبين خطوط الفيض المغناطيسي الناشئة عن تيار I في الموصل 1 لوحده

$$\frac{\mu_o \mathbf{I}}{2\pi}\int_o^a \frac{dx}{x}$$

والذي سيكون لا نهائياً) لذلك يجب علينا أن نتفحص الفيض الرابط ضمن موصل ذي نصف قطر محدود مقداره r .

2.2.1 الفيض الرابط ضمن الموصل المنتج للفيض

FLUX LINKAGES WITHIN THE CONDUCTOR PRODUCING THE FLUX

لقد افترض أن كثافة التيار على مقطع السلك تكون ثابتة . سيكون هذا صحيحاً فقط اذا تم (أ) اهمال التأثير السطحي عند 50Hz رغم أنه من الممكن أن يكـون ملحوظاً في المقطع الذي قد نحتاجه لحمل تيارات خط كبيرة (ب) اهمال عدم الانتظام بسبب تدلي السلك أو بسبب مغنطة اللب الفولاذي (ج) اهمال التأثير التقاربـي لانتشار التيار في موصل رقم 1 كونه أثير بوساطة المجال المغناطيسي للتيار $\mathbf{I}-$ في الموصل 2 .

لقد افترضنا أن الخطوط المغناطيسية للفيض داخل الموصل 1 هي دوائر متحدة المركز مع محور الموصل . كل من خطوط الفيض هذه سترتبط فقط مع جزء من تيار الموصل الكلي $\mathbf{I}$ فمثلاً الخط عند نصف قطر $x(x<r)$ يرتبط فقط مع

$$\mathbf{I}(x^2/r^2) = \mathbf{I}_x, \qquad [2.3]$$

وتعريـف المحاثـة $L = \dfrac{N\Phi}{I}$ لعدد لفات N و $L = \Phi/I$ بالنسبة للفة واحدة من خط احادي الطور سيكون محدوداً جدا بالنسبة للتعامل مع ترابط الفيضـ الداخلي . اذا أخذنا أنابيب من التيار وأنابيب من الفيض وكل منها له كميات جزئية متشابهة من التيار والفيض ذات δI A و $\delta\Phi$ Wb/m على التتابع ، والتي تكون التوزيع ضمن الموصل . أنئذ اذا تبصرنا في الطاقة المخزونة في المجال المغناطيسي والتي هي $\frac{1}{2}LI^2$ joules . من الممكن كتابة المحاثة الذاتية الداخلية باحدى الطريقتين التاليتين

$$L_i = \frac{1}{I^2}\Sigma(\Phi\delta I) \text{ H/m.} \qquad [\text{أ } 2.4]$$

$$L_i = \frac{1}{I^2}\Sigma(I_x\delta\Phi) \text{ H/m.} \qquad [\text{ب} 2.4]$$

سنستعمل المعادلة [2.4 ب] ، والتي ينقسم فيهى الفيض الى عناصر $\delta\Phi$ كل منها مضروب بكمية من التيار I_x والتي تكون مرتبطة معها . عندما تجمع هذه كلها على كل مقطع الموصـــل ، فالنتيجة ستقسم على مربع التيار. فعليا ، هذه العمليـة تتضمن التفكير بتيار الموصل الكلي الجاري في دورة واحدة كاملة بحيث أنه عندما يكون كل من الفيض الرابط الجزئي $I_x\delta\Phi_x$ يربط جزءاً من اللفة فقط ثم أخذ تكاملها لتعطي ترابط الفيض – التيار الجزئي الكلي فيجب ان نقسم على I لنحصل على الفيض الذي يعتقد أنه سيرتبط مع كل اللفة التي تحمل التيار . ترابط الفيض هذا يجب أن يقسم على التيار I بالطريقة المعتادة ليعطي المحاثة بحيث أن التعبير الرياضي للمحاثةسيكون

$$L = \frac{\int \text{ترابط الفيض – التيار}}{I^2}$$

اذا كان الموصل رقم 1 ، والمبين مقطعه في شكل2.2، والذي هو واحد من الزوج المبين في شكل 2.1 ، مع موصل الترجيع الخاص به على بعد d metres، حيث ان $d \gg r$، يحمل تياراً كلياً مقداره I موزعاً بانتظام على طوال المقطع ، أنئذ فان كثافة الفيض عند نصف قطر x حيث أن $x<r$ ستكون

$$B_x = \frac{\mu_o I_x}{2\pi x} \text{ tesla} \qquad [2.5]$$

حيث ان I_x هو التيار الجاري ضمن نصف القطر x والمعطى بالمعادلة [2.3] ، لذلك

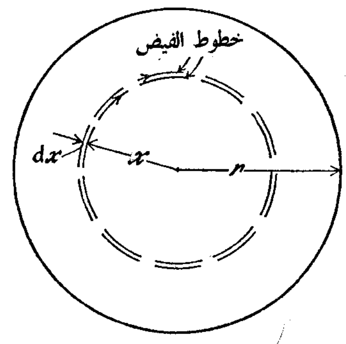
$$B_x = \frac{\mu_o I x}{2\pi r^2} \text{ tesla}$$

اذا قسم الفيض الى دوائر حلقية ذات نصف قطر x وعرض اشعاعي dx وطور محوري 1 metre ، عندئذ ستحتوي كل منها على فيض مقداره $\delta\Phi$ حيث أن

$$\delta\Phi = \frac{\mu_o I x \, dx}{2\pi r^2} \text{ Wb.}$$

هذا الجزء الضئيل من الفيض $\delta\Phi$ / متر طول من الموصل سيرتبط مع التيار I_x الجاري ضمن نصف قطره . وبذلك

$$\text{ترابط التيار / متر } I_x\delta\Phi = \frac{\mu_o I^2 x^3 \, dx}{2\pi r^4}$$



شكل . 2.2. مقطع عرضي للموصل 1 .

المحاثة / متر طول للموصل 1 بسبب ترابط الفيض الداخلي المتسبب بوساطة تيارهـا الخاص هي كما في المعادلة (2.4 ب) وستكون

$$L_i = \frac{\mu_o}{2\pi r^4}\int_o^r x^3\,\mathrm{d}x$$
$$= \frac{\mu_o}{8\pi} = \frac{10^{-7}}{2}\ \mathrm{H/m}. \qquad [2.6]$$

يجب ان يلاحظ بان التحليلات أعلاه تفترض موصلاً متجانساً غير مغناطيسـي . تأثير الجدولة سيناقش باختصار في الفصل 2.7 وكذلك سيناقش تأثير اللب الفولاذي .

2.2.2 ترابط الفيض خارج الموصل المنتج للفيض

FLUX LINKAGES OUTSIDE THE CONDUCTOR PRODUCING THE FLUX

كما يؤشر شكل 2.1 فالفيض الناتج بوساطة تيار في موصل رقم 1 يرتبط مع كل تيار الموصل I لقيم x بين r و$(d-r)$. بالنسبة لـ $(d-r)<x<(d+r)$ فان جزء التيار المرتبط يتناقص من 1 الى صفر . اذا افترض ان الفيض يربط كل التيار I من r الى d ولا يوجد اي تيار من d الى$(d+r)$ فبالنسبة لـ $d \gg r$ سيكون هناك خطأ قليل جدا في حساب المحاثة الخارجية المؤثرة L_e وغالبا ما نعمل هذه الفرضية في حساباتنا . الفيض في جزء ضئيل حلقي ذي نصف قطر x وذي عرض اشعاعي $\mathrm{d}x$ وطـول

محوري 1 متر ، حيث ان $x>r$ بسبب التيار I في موصل رقم 1 ، يمكن كتابته من المعادلة [2.2] على انه $\mu_o I\,dx/2\pi x$. هذا الفيض يفترض ان يرتبط مع تيـــار I في دائرة ذات لفة واحد ة بالنسبة لـ $r<x<d$ لذلك من المعادلـــة [2.1]

$$L_e = \frac{\mu_o}{2\pi}\int_r^d \frac{dx}{x}$$

$$= \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{d}{r}\ \text{H/m.} \qquad [2.7]$$

مجموع المحاثات L_i+L_e يعطي محاثة الدائرة الكلية بسبب التيار I في الموصل رقم 1.
بما اننا افترضنا ان انصاف اقطار الموصلات متساوية فان التيار I– في موصل رقـــم 2 سيسهم بقوة دافعة مغناطيسية (ق . د . مغ) مشابهة بالضبط وبالطور نفسه مع الاخـــر وبما انه قد افترض نفاذيـــة ثابتة كذلك ، فان ترابط الفيض ثم المحاثات يمكــــن جمعها مباشرة .

دائرة او حلقة احادية الطور تحتوي على محاثة كلية مقدارها $2(L_i+L_e)$ لكل متر طول من مسارها ونصف هذا يمكن ان يدعى بالمحاثة لكل موصل . التعبير الرياضـــــي

$$(L_i+L_e)\ \text{H/m} = L = \frac{\mu_o}{2\pi}\left[\log_e\left(\frac{d}{r}\right)+\frac{1}{4}\right]\text{H/m} \qquad [2.8]$$

يمكن استعماله اما

(أ) لاعطاء المحاثة لموصل واحد / متر من طول المسار : يستعمل هنا الطول الفعلـي لموصل واحد او طول المسار . (ان تبرير تطبيق فكرة المحاثة والتي هي خاصيـــة لدائرة ، على موصل مفرد من خط ثلاثي الطور ستبين في الفقرة 2.4) . أو

(ب) لاعطاء محاثة كل الحلقة المتضمنة لكلا الموصلين الذاهب والراجع / متر من الطول مقاسا حول الحلقة : يستعمل هنا طول الحلقة والذي هو ضعف طـــول المسار .

لكي يمكن كتابة المعادلة [2.8] بالصيغة التالية :

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{d}{r_m}\ \text{H/m} \qquad [2.9]$$

فقد تم استعمال نصف قطر محور r_m حيث أن

$$r_m = r\,e^{-\frac{1}{4}},$$

وهذا يدعى متوسط نصف القطر الهندسي للموصل (م. ن .ه) أومتوسط البعد الهندسي الذاتي منها نفسها (م. .ب.ه الذاتي) . مقارنة مع المعادلة [2.7] تبين أن r_m يمكن اعتباره نصف القطر المؤثر للموصل والذي يمكن اهمال ترابط الفيض الداخلي له .

على الطالب أن يثبت لنفسه أنه بصورة عامة

$$r_m = r\,e^{-\mu_c/4},$$

لجديلةمفرده لمقطع موصل دائري في الهواء ذي نفاذية نسبية مؤثرة مقدارها μ_c . تأثير تعدد الجدائل وتلك ذات اللب الفولاذي معطاة بالتفصيل من قبل (1954 Butterworth) تمرينا للطالب عليه ان يحقق انه اذا كان للموصلين نصفا قطر مختلفان هما r_1 و r_2 فان معدل المحاثة بسبب الفيض الخارجي سيكون

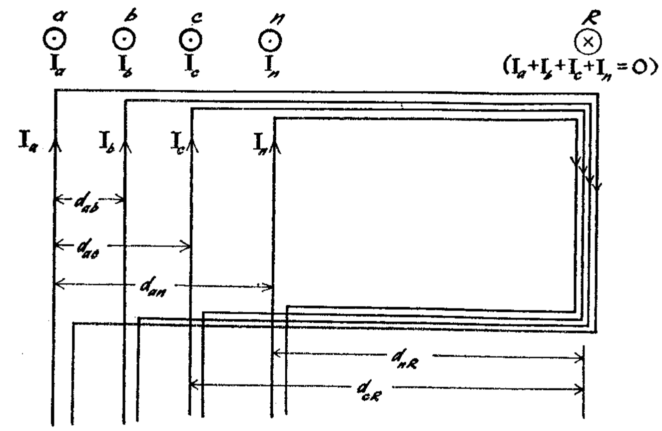
$$\frac{\mu_o}{2\pi}\log_e \frac{d}{\sqrt{(r_1 r_2)}}\ \text{H/m}.$$

2.3 منظومة متعددة الموصلاتُ عامة *

General Multi-conductor System

معظم المنظومات متعددة الموصلات التي سنشير اليها هنا ستكون لدائرة أحادية ذات خطوط نقل ثلاثية الطور بحيث ان الاهتمام سيكون لمنظومات الموصلات الثلاثة أو الاربعة بصورة رئيسية . سوف لايكون في نطاق هذا الفصل التبصر بتفصيل كبير في التأثيرات المتبادلة بين الدوائر الثنائية ذات الخطوط الثلاثية – الطور ، وبين خطوط نقل القدرة والدوائر الأخرى ، مثلاً التداخل مع خطوط الهاتف ، وخطوط النقل ذات الموصلات الحزمية التي يكون لكل طور فيها أكثر من موصل واحد . الأخير وخطوط النقل ذات الدوائر الثنائية ستذكر بأختصار في الفقرتين 2.8 و 2.9 .

التداخل ، مثل تولد أشارات ذات 50 Hz في دوائر مثل خطوط هاتف تسير بالقرب من خطوط علوية معلقة لنقل القدرة ، سوف لايناقش هنا . من جهة أخرى ، مــن المناسب أن يلاحظ أن المعادلة [2.11] التي سيرد أشتقاقها فيما بعد يمكــــن أستعمالها لتقرير فولتية تردد القدرة المحتثة في دائرة مجاورة وبعض الأمثلة سيشملها هذا الفصل في نهايته حول مثل هذا النوع من الحسابات.



شكل 2.3 خط ثلاثي الطور ذو دائرة احادية مع سلك أرضي وموصل مرجع وهمي

يبين شكل 2.3 خطاً ثلاثي الطور في الهواء مع موصل محايد n حيث أن $I_a+I_b+I_c+I_n = 0$ (اذا كان من الممكن أهمال تأثير الارضي نفسه) . اذا كان R موصلاً مرجعاً وهمياً فان كلاً من التيارات الاربعة يمكن ان نتصوره أنه يدور فــــي دائرة ذات لفة واحدة فمثلا I_a يجري في a و R ، I_b في b و R ...الخ. بما ان التيار في R سيكون صفراً عند كل الأزمنة فهو موصل خيالي ذو موضع أختياري نسبة الى الموصلات الحقيقية . وبما ان كل الدوائر لها لفة واحدة فان ترابط الفيض مع أي دائرة يكون مساويا للفيض المرتبط مع تلك الدائرة ، فمثلا الفيض Φ_a يربط الدائرة المتألفة من a و R .

من المعادلتين [2.1] و[2.9] يكون الفيض المرتبط مع الدائرة المتألفة من a و R بسبب التيار I_a في الموصل a هو

$$\Phi'_a = \frac{\mu_o I_a}{2\pi} \log_e \frac{d_{aR}}{r_m} \text{ Wb/m} \qquad [2.10]$$

حيث أن r_m هو م.ن.هـ لكل الموصلات ذات الاطوار الثلاثة ، والموصل المحايد له م.ن.هـ. مقداره r'_m .

الفيض Φ''_a المرتبط مع الدائرة نفسها بسبب سريان التيار I_b في الموصل b يحدث بوصفه خطوط فيض دائرية مع محور الموصل b بوصفه مركزاً وبين الحافتين الاعتبار المحددة d_{ab} و d_{bR} بحيث أن

$$\Phi''_a = \frac{\mu_o}{2\pi} I_b \log_e \frac{d_{bR}}{d_{ab}} \text{ Wb/m.} \qquad [2.11]$$

بجمع المعادلتين [2.10] و[2.11] مع الاسهامين اللذين يسببهما التياران I_c و I_n ، فقيمة ج.م.ت الكلية للفيض المرتبط مع دائرة a و R يكون

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a \log_e \frac{d_{aR}}{r_m} + I_b \log_e \frac{d_{bR}}{d_{ab}} + I_c \log_e \frac{d_{cR}}{d_{ac}} + I_n \log_e \frac{d_{nR}}{d_{an}}\right) \qquad [2.12]$$

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a \log_e \frac{1}{r_m} + I_b \log_e \frac{1}{d_{ab}} + I_c \log_e \frac{1}{d_{ac}} + I_n \log_e \frac{1}{d_{an}} + I_a \log_e d_{aR} + I_b \log_e d_{bR} + I_c \log_e d_{cR} + I_n \log_e d_{nR}\right) \qquad [2.13]$$

وبتعويض $I_n = -(I_a + I_b + I_c)$ في الحد الاخير للمعادلة [2.13] نحصل على

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a \log_e \frac{1}{r_m} + I_b \log_e \frac{1}{d_{ab}} + I_c \log_e \frac{1}{d_{ac}} + I_n \log_e \frac{1}{d_{an}} + I_a \log_e \frac{d_{aR}}{d_{nR}} + I_b \log_e \frac{d_{bR}}{d_{nR}} + I_c \log_e \frac{d_{cR}}{d_{nR}}\right). \qquad [2.14]$$

بما ان الموصل الوهمي R ليس له معنى فيزياوي في الحقيقة فان موقعه سيكون اختيارياً وعندما يبتعد اكثر عن الموصلات الحقيقية فان كلا من الحدود الثلاثة في المعادلة [2.14] تقترب من الصفر ، لانه عندما يكون R عند اللانهاية ستكون الموصلات الاربعة على بعد متساو منها . لذلك فان Φ_a والتي تمثل الفيض المرتبط مع الموصل a تصبح

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(I_a \log_e \frac{1}{r_m} + I_b \log_e \frac{1}{d_{ab}} + I_c \log_e \frac{1}{d_{ac}} + I_n \log_e \frac{1}{d_{an}}\right). \qquad [2.15]$$

يجب ان نلاحظ انه اذا كتبنا r_m ، التي هي متوسط البعد الهندسي الذاتي للموصل a من نفسه ، على انها d_{aa} فسنحصل على ترميز مزدوج سفلي متوافق .

الفيوض المرتبطة مع الموصلات الاخرى يمكن الحصول عليها تبعا لذلك كما يلـــي : للحصول على Φ_b بادل a و b في المعادلة [2.15] ، للحصول على Φ_c بادل a و c في المعادلة [2.15] وهكذا . المعادلات الاربع الناتجة لـ Φ_c وΦ_b وΦ_c وΦ_n والتـــي ستكون المعادلة [2.15] هي الاولى فيها ، يمكن كتابتها بصورة اكثر ملائمة وململمة على هيئة مصفوفة كما في المعادلة [2.16] بدلا من معادلات منفصلة .

لفائدة الطلبة غير المتمرسين على استخدام المصفوفات في هذ المرحلة فالمعادلات الثلاثة الاخيرة من مجموعة الاربع معادلات الممثلة بالمعادلة [2.16] قد كتبت بصورة منفصلة . بمقارنة المعادلة [2.15] وهذه المعادلات الثلاث مع المصفوفة في المعادلة[2.16] فان الطالب يجب ان يلاحظ كيفية كتابة معادلات منفردة من المصفوفات المستعملة قواعدضرب المصفوفات التي طبقت هنا هي ان العنصر الاول في المصفوفة العمودية على جهة اليسار للمعادلة [2.16] هو حاصل جمع كل من العناصر في السطر الاول للمصفوفة الاولى على اليمين مضروبة بالعنصر الموافق من المصفوفة العمودية الاخيرة للتيارات ، وهذا يعني (عنصر من عمود 1) × (عنصر من سطر 1) + (عنصر من عمود 2) × (عنصر من سطر 2)+ ...الخ . وتعاد هذه لكل سطر لبناء العناصر الاخرى للمصفوفة العمودية التي على اليسار . هذا كل ما نحتاجه في هذه المرحلة . التطبيقات الاخرى لجبر المصفوفات على تحليلات منظومات القوى سوف لانتعامل معها في هذا الجزء من الكتاب ولكنها ستظهر في الجزء الثاني . المعادلات الثلاث الاخيرة لـ[2.16]هي :

$$\mathbf{\Phi}_b = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{d_{ba}} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{r_m} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{d_{bc}} + \mathbf{I}_n \log_e \frac{1}{d_{bn}}\right)$$

$$\mathbf{\Phi}_c = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{d_{ca}} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{d_{cb}} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{r_m} + \mathbf{I}_n \log_e \frac{1}{d_{cn}}\right)$$

$$\mathbf{\Phi}_n = \frac{\mu_o}{2\pi}\left(\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{d_{na}} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{d_{nb}} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{d_{nc}} + \mathbf{I}_n \log_e \frac{1}{r'_m}\right)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{\Phi}_a \\ \mathbf{\Phi}_b \\ \mathbf{\Phi}_c \\ \mathbf{\Phi}_n \end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi} \log_e \begin{bmatrix} \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{ab}} & \frac{1}{d_{ac}} & \frac{1}{d_{an}} \\ \frac{1}{d_{ba}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{bc}} & \frac{1}{d_{bn}} \\ \frac{1}{d_{ca}} & \frac{1}{d_{cb}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{cn}} \\ \frac{1}{d_{na}} & \frac{1}{d_{nb}} & \frac{1}{d_{nc}} & \frac{1}{r'_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \\ \mathbf{I}_n \end{bmatrix} \quad [2.16]$$

يجب ان نلاحظ بان الفيض الرابط لكل موصل يكون جزءٌ منه بسبب التيار في ذلك الموصل (تاثير المحاثة الذاتية) وجزء بسبب التيار في جميع الموصلات الاخرى (تاثير المحاثة المتبادلة). العناصر القطرية (والتي هي

$$\frac{1}{r_m}, \frac{1}{r_m}, \frac{1}{r_m} \quad \text{و} \quad \frac{1}{r'_m} \quad \text{أو} \quad \frac{1}{d_{aa}}, \frac{1}{d_{bb}}, \frac{1}{d_{cc}} \quad \text{و} \quad \frac{1}{d_{nn}}$$

كما يمكن كتابتها) في المعادلة [2.16] تمثل تاثيرات المحاثة الذاتية وبقية العناصر تمثل تاثيرات المحاثة المتبادلة .

الفيض Φ_a هو ذاك المرتبط مع الدائرة المتألفة من موصل a وموصل R ولكن بما ان الموصل الأخير ليس له حقيقة فيزياوية فالمحاثة الذاتية للدائرة aR يمكن أن تدعى بالمحاثة الذاتية للموصل a وهذه يرمز لها بـ L_{aa} . وبطريقة مشابهة فالمحاثة المتبادلة بين الدوائر aR و bR يمكن أن تدعى المحاثة المتبادلة L_{ab} بين الموصلين a و b .

مصفوفة المعاملات في [2.16] تكون متماثلة حول القطر لأن . على فرض ان المنافذه للدائرة المغناطيسية تكون ثابتة كما يجب أن تكون بالنسبة للموصلات غير المغناطيسية في الهواء . المحاثة المتبادلة بين دائرتين تكون تبادلية وهذا يعني $L_{ab} = L_{ba}$ و$L_{ac} = L_{ca}$ ....الخ .

بما ان كل موصلين من خط النقل يؤلفان بصورة فعلية دائرة ذات لفة مفردة . فان المعادلة [2.16] يمكن كتابتها من المعادلة [2.1] باستعمال L_{aa} و L_{bb} ....الخ رموزاً للمحاثة الذاتية L_{ab} و L_{bc} ....الخ رموزاً للمحاثة المتبادلة وكما يلي :

$$\begin{bmatrix}\mathbf{\Phi}_a\\ \mathbf{\Phi}_b\\ \mathbf{\Phi}_c\\ \mathbf{\Phi}_n\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{an}\\ L_{ab} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bn}\\ L_{ac} & L_{bc} & L_{cc} & L_{cn}\\ L_{an} & L_{bn} & L_{cn} & L_{nn}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\mathbf{I}_a\\ \mathbf{I}_b\\ \mathbf{I}_c\\ \mathbf{I}_n\end{bmatrix} \qquad [2.17]$$

التماثل حول حدود المحاثة الذاتية القطرية يجب أن يلاحظ .

في أغلب الحالات . يكون السلك المحايد n سلكاً أرضياً هوائياً يمر فوق موصلات الأطوار الثلاثة لكي يوفر بعض الحماية من الصواعق المباشرة (أنظر الجزء 2) . ويجب ان لايؤخذ بالحساب عند التعامل مع المحاثة . ذلك أنه لتياري التتابع الموجب والسالب (أنظر الفصل 8) في موصلات الخط . يكون مجموع تيارات الخط الثلاثة صفراً . والسلك الأرضي لايحمل تياراً محايداً . عدا ذلك الذي تسبب جريانه بوساطة الحث بسبب المجال المغناطيسي المشترك لموصلات الخط الثلاث . هذا التيار سيكون صغيرا جدا لأن. كما تبين المعادلة [2.2] . المجال المغناطيسي

المنتج بوساطة تيار خط مفرد يتناسب عكسيا مع المسافة المأخوذة من محور الموصل ، وعند السلك الأرضي فالقوى الدافعة المغناطيسية بسبب تيارات الخط الثلاثة الموجبة او السالبة التتابع ستكون لها أزاحة طورية مقدارها 120° من أحدها الى الاخر وتكون متساوية تقريبا . لذلك فمحصلة الق - د . مغ تكون صغيرة نسبياً . المستوى الأرضي كان من الممكن اهماله عند حساب محاثة التتابع الموجبة او السالبة ، لأنه حتى لو أنه كان مستوياً تام التوصيل الكهربائي ، والحقيقة ليست كذلك ، ستبرز حداً هو $-\mu_o/2\pi \log_e(d'/2h)$ فقط في المعادلة [2.9] لخط ذي طور واحد . h هو أرتفاع الموصلين فوق الأرض ، و d' هي المسافة من موصل رقم 1 الى خيال الموصل 2 . هذا الحد الاضافي ، والذي يمكن الحصول عليه باستعمال طريقة الخيالات (Carter, 1967) ، يكون صغيراً جداً مقارنة مع التعبير الرياضي في المعادلة [2.9]

عندما تحتوي تيارات الأطوار الثلاثة على تيار تتابع صفري (أنظر الفصل 8) بسبب عطل ارضي . فالارضي نفسه من الممكن أن يوفر ممراً ذا ممانعة أقل بكثير من السلك الارضي وهذا سنتعامل معه في الفقرة 2.6 .

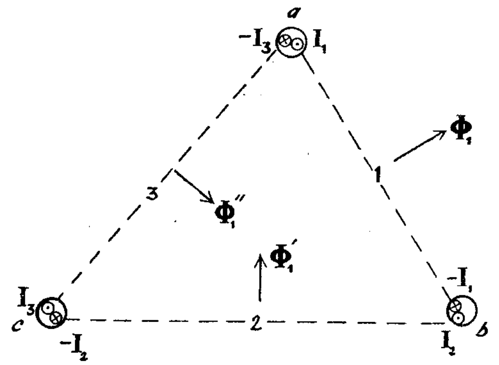
سنتبصر الأن في منظومة الموصلات الثلاثة بحيث أننا سنهمل الموصل n في شكل 2.3 .

2.4 المحاثة الذاتية المؤثرة لموصل Effective Conductor Self-inductance

تبصر في منظومة الاسلاك الثلاثة الثلاثية الطور المبينة في الشكل 2.4 وأفترض أن كل زوج من الموصلات ab و bc و ca مأخوذة بالتتابع تعمل بوصفها دائرة ذهاب واياب يرمز لها 1 و 2 و 3 على التعاقب حيث أن كلاً من هذه الدوائر تجهز تيار I_1 و I_2 و I_3 على التعاقب الى حمل مكافيء ذي ربط مثلثي . التيارات الفعلية في موصلات الخطوط الثلاثة a و b و c والتي تجري الى حمل قد يكون متوازناً أو لايكون هي I_a و I_b و I_c حيث ان $I_a = I_1 - I_3$ و $I_b = I_2 - I_1$ و $I_c = I_3 - I_2$

المحاثة الذاتية L_{11} للدائرة 1 تكون مساوية الى ترابط الفيض المتكون في تلك الدائرة بوساطة جريان 1 أمبير في a و -1 أمبير في b . ترابط الفيض المتكون في

دائرة 1 لجريان 1 أمبير في a هو $L_{aa}-L_{ab}$ ، وذاك المتكون بوساطة -1 أمبير في b هو $L_{bb}-L_{ab}$.



الشكل 2.4 ثلاثة موصلات مبين على كونها مؤلفة لثلاث دوائر فعالة

لذلك $L_{11} = L_{aa}+L_{bb}-2L_{ab}$ ومن [2.16] و [2.17]

$$L_{11} = \frac{\mu_o}{\pi} \log_e \frac{d_{ab}}{r_m} \text{ H/m.}$$

المحاثة المتبادلة بين الدائرتين ab و ac تساوي L_{13} . ترابط الفيض المتكون في ac بوساطة جريان 1 أمبير في الموصل a هو $L_{aa}-L_{ac}$. ترابط الفيض المتكون في ac بوساطة جريان -1 أمبير في موصل b هو $L_{bc}-L_{ab}$. لذلك

$$L_{13} = L_{aa}+L_{bc}-L_{ab}-L_{ac}. \qquad [2.18]$$

وعندما يجري I_1 في a و $-I_1$ في b و $I_1 = 1$ أمبير ، فان الفيوض لـ L_{11} و L_{12} و L_{13} ستتكون في الدوائر 1 و 2 و 3 في الاتجاهات المبينة بالاسهم في شكل 2.4 وهذا يعني $\Phi_1 = L_{11}$ و $\Phi_1' = L_{12}$ و $\Phi_1'' = L_{13}$ و $L_{11} = L_{12}+L_{13}$ لانه لايوجد هناك طريق آخر للفيض .

وعندما تجري التيارات I_1 و I_2 و I_3 كما مبين في الدوائر الثلاث فالفيض المرتبط مع دائرة 1 هو $L_{11}I_1-L_{12}I_2-L_{13}I_3,$ ، لان التيار الموجب في دائرة 2 أو 3 سينتج فيضاً سالباً (وهذا يعني مع مركبة بالاتجاه

المعاكس الى ذاك المبين بالسهم على الفيض Φ_1 المتكون بوساطة جريان التيار المبين في دائرة 1 والذي أخذ على اساس أنه موجب) ، المرتبط مع دائرة 1 كما مبين في شكل 2.4 . بتغيير L_{11} ب $L_{12}+L_{13}$, فالفيض المرتبط مع دائرة 1 يكون

$$L_{12}(\mathbf{I}_1-\mathbf{I}_2)+L_{13}(\mathbf{I}_1-\mathbf{I}_3) = -L_{12}\mathbf{I}_b+L_{13}\mathbf{I}_a.$$

وهكذا تتولد ق . د . ك . في الدائرة ab وكأن الموصل a كان دائرة ذات لفة واحدة وذا محاثة L_{13} وموصل b كان دائرة ذات لفة واحدة وذا محاثة L_{12} ، بدون اي محاثة متبادلة بين a و b .

خط نقل ثلاثي الطور ، سواء كانت التيارات متوازنة أم لا على شرط أن يكون $\mathbf{I}_a+\mathbf{I}_b+\mathbf{I}_c = 0$ ، يمكن لذلك أن يعامل كأن كل موصل طور لهمحاثة ذاتية مؤثرة .

$$\begin{aligned} L_{13} &= L'_{aa} = a \text{ المحاثة الذاتية المؤثرة للموصل} \\ L_{12} &= L'_{bb} = b \text{ المحاثة الذاتية المؤثرة للموصل} \\ L_{23} &= L'_{cc} = c \text{ المحاثة الذاتية المؤثرة للموصل} \end{aligned} \qquad [2.19]$$

من المعادلة [2.18]

$$L'_{aa} = L_{13} = L_{aa}+L_{bc}-L_{ab}-L_{ac}$$

ومن [2.16] و [2.17] من الممكن تعويض قيم للحدود التي على جهة اليمين . لتعطينا

$$L'_{aa} = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{d_{ab}d_{ac}}{r_m d_{bc}}\ \text{H/m.} \qquad [2.20]$$

$$L'_{bb} = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{d_{ab}d_{bc}}{r_m d_{ac}}\ \text{H/m.} \qquad [2.21]$$

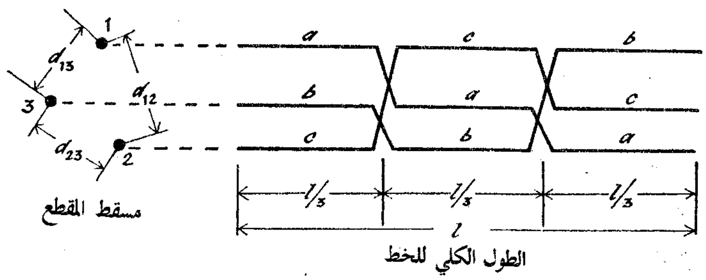
$$L'_{cc} = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{d_{bc}d_{ac}}{r_m d_{ab}}\ \text{H/m.} \qquad [2.22]$$

عندما لاتكون موصلات الطور على زوايا مثلث متساوي الأضلاع . ومن الناحية التطبيقية سوف لاتكون موضوعة كذلك . فالمحاثة الذاتية المؤثرة لكل طور تختلف عن تلك التي للاخريات كما مبين في المعادلات [2.20] و [2.21], [2.22] .

2.5 محاثة التتابع الموجب أو السالب لخط ثلاثة أطوار ذي دائرة أحادية مبدلة الموضع

Positive- or Negative-sequence Inductance of a Transposed Single-circuit 3-phase Line

اذا كان الخط طويلا بما فيه الكفاية وعدم التوازن في المحاثة (والسعة) بين الاطوار كان كبيرا لكي يسوغ الكلفة ، فمن الممكن تبديل موضع الخط . في هذه الحالة يتم تبادل مواضع موصلات الاطوار عند ابراج خاصة لتبادل الموضع ، وموصل كل طور يشغل كلا من المواضع الثلاثة 1 و 2 و 3 لكل ثلث من طوله تقريبا وكما موضح في شكل 2.5 .



شكل 2.5 ثلاثة موصلات متبادلة الموضع

ترابط الفيض Φ_a / متر طول من مسار موصل الطور a . بوصفه معدلا فوق كل طوله l . يمكن ان يكتب من المعادلة [2.16] . حيث ان المسافات يجب ان تكتب الان على أنها d_{12} و d_{23} و d_{13} بدلا من d_{ab} و d_{bc} و d_{ac} بما أن الاخير يكون متغيراً

$$\begin{aligned}\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\frac{1}{3}\Big(&\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{r_m} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{d_{13}} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{d_{12}} + \\ &\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{r_m} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{d_{23}} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{d_{13}} + \\ &\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{r_m} + \mathbf{I}_b \log_e \frac{1}{d_{12}} + \mathbf{I}_c \log_e \frac{1}{d_{23}}\Big) \\ = \frac{\mu_o}{2\pi}\Big(&\mathbf{I}_a \log_e \frac{1}{r_m} + (\mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c) \log_e \frac{1}{\sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}}\Big)\end{aligned}$$

اذا افترضنا ان لايكون هناك خطأ ارضي على المنظومة وأن تيارات التتابع الموجب والسالب تجري فقط ، فان $(\mathbf{I}_b+\mathbf{I}_c) = -\mathbf{I}_a$ و

$$\Phi_a = \frac{\mu_o}{2\pi}\mathbf{I}_a \log_e \frac{D_m}{r_m}$$

حيث ان

$$D_m = \sqrt[3]{(d_{12}d_{23}d_{13})}$$

ويدعى متوسط المباعدة أو البعد الهندسي بين الموصلات .

وهكذا فالمحاثة الذاتية المؤثرة لكل موصل طور لخط ثلاثة اطوار ، التي تكون غير معتمدة على اتجاه دوران الطور فهي لذلك تكون نفسها لكلا تياري التتابع الموجب والسالب (انظر الفصل 8) ، تكون كما يلي

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e \frac{D_m}{r_m}\ \text{H/m.} \qquad [2.23]$$

هذا التعبير الجبري يمكن استعماله بصورة عامة حتى اذا لم يكن قد بدل موضع الخط . بما ان الشائع هو عدم تبديل الموضع . وحينئذ يكون عدم التوازن بين L'_{aa} و L'_{bb} و L'_{cc} صغيرا والتقريب يسوغ اخذ المعادلة [2.23] والتي هي معدل قيم L'_{aa} و L'_{bb} و L'_{cc} وكما يرى في [2.20] و[2.21] و[2.22] .

بما ان D_m/r_m تكون بحدود 300 الى 400 بالنسبة لخطوط الفولتية العالية جداً ، فالمحاثة تكون حوالي 1.2 mH/km بالنسبة لكل من الموصلات الثلاثة للخط الثلاثي الطور .

يجب ان يلاحظ أن (2.23) يمكن كتابها كما يلي

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e \frac{1}{r_m} + \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e D_m.$$

الحد الاول يمكن تسميته بالمحاثة عند مباعدة 1 متر . والتي يمكن ان تشمل في بعض الجداول وتعتمد فقط على الموصل والذبذبة . الحد الثاني في المفاعلة يكون لذلك غير معتمد على نوع الموصل ويشمل المباعدة والذبذبة .

2.6 محاثة التتابع الصفري لخط ثلاثة أطوار ذي دائرة أحادية مبدلة الموضع

Zero Sequence Inductance of a Transposed Single Circuit 3 - Phase Line

نقترح على الطلبة دراسة بعض اجزاء الفصل 8 قبل قراءة هذه الفقرة. بالنسبة لتيار التتابع الصغري

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_b = \mathbf{I}_c = \mathbf{I}_o.$$

اذا كان التيار الراجع $3\mathbf{I}_o$ قد افترض أن يجري كليا في الارض، وليس في السلك الارضي الهوائي المعلق فوق موصلات الاطوار، أنئذ هذا التيار $3\mathbf{I}_o$ يمكن ان يفتــرض جريانه في موصل ارضي راجع مكافيء عند عمق D_e تحت موصلات الاطوار. بما أن $d_{ab} \ll D_e$ و d_{bc} و d_{ac} فالمسافة من كل موصلات الاطوار الثلاثة الى هذا الموصل الارضي المكافيء يمكن اعتبارها D_e

لقد وجدنا ان

$$D_e \simeq k\sqrt{(\rho/f)}$$

حيث أن ρ هي مقاومية الارضي والتي تكون متغيرة كثيرا فمثلا

طبيعة الارض	ρ (ترتيب المقدار)
أرض مستنقع	10 - 100 أوم متر
أرض يابسة	1000 أوم متر
صخر	10^7 أوم متر
حجر رملي	10^9 اوم متر

f تردد المصدر

وبالنسبة لمصدر 50-Hz تكون

$$D_e \simeq 93\rho^{\frac{1}{2}} \text{ metres.}$$

بالنسبة لأول المواضع المبدلة الموضع المبين في شكل 2.5 . وهذا يعني عندما تكون $d_{ab} = d_{13}$ و $d_{ac} = d_{12}$ و $d_{bc} = d_{23}$. ترابط الفيض مع الموصلات يمكن كتابته من[2.16] كما يلي

$$\begin{bmatrix} \Phi'_a \\ \Phi'_b \\ \Phi'_c \end{bmatrix} = \frac{\mu_o}{2\pi}\log_e \begin{bmatrix} \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{13}} & \frac{1}{d_{12}} & \frac{1}{D_e} \\ \frac{1}{d_{13}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{d_{23}} & \frac{1}{D_e} \\ \frac{1}{d_{12}} & \frac{1}{d_{23}} & \frac{1}{r_m} & \frac{1}{D_e} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_o \\ \mathbf{I}_o \\ \mathbf{I}_o \\ = -3\mathbf{I}_o \end{bmatrix}$$

اما في الموضع الثاني ، وهذا يعني عندما تكون $d_{ab} = d_{23}$ ...الخ

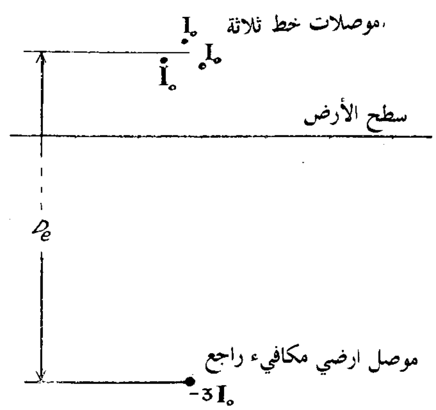
$$\Phi''_a = \frac{\mu_o \mathbf{I}_o}{2\pi}\left(\log_e \frac{1}{r_m} + \log_e \frac{1}{d_{23}} + \log_e \frac{1}{d_{13}} - 3\log_e \frac{1}{D_e}\right)$$

وفي الموضع الثالث

$$\Phi'''_a = \frac{\mu_o \mathbf{I}_o}{2\pi}\left(\log_e \frac{1}{r_m} + \log_e \frac{1}{d_{12}} + \log_e \frac{1}{d_{23}} - 3\log_e \frac{1}{D_e}\right)$$

ومعدل ترابط الفيض مع موصل طور a يكون

$$\frac{1}{3}(\Phi'_a + \Phi''_a + \Phi'''_a) = \frac{1}{3}\frac{\mu_o \mathbf{I}_o}{2\pi}\left(3\log_e \frac{D_e}{r_m} + 2\log_e \frac{D_e^3}{d_{12}d_{23}d_{13}}\right)$$
$$= \frac{1}{3}\frac{\mu_o}{2\pi}\mathbf{I}_o \log_e \frac{D_e^9}{r_m^3 D_m^6}.$$



شكل 2.6. موصلات الخطوط الثلاثة الحاملة لتيار تتابع صفري مع الموصل الأرضي المكافيء الراجع

وهكذا فالممانعة الحثية للتتابع الصفري لـكل موصل طور تكون

$$X_o = 2\pi f\left(3\frac{\mu_o}{2\pi}\log_e\frac{D_e}{\sqrt[3]{(r_m D_m^2)}}\right)\Omega/\text{m}. \qquad [2.24]$$

يمكن ان نرى من المعادلة [2.24] ان ممانعة التوالي للتتابع الصفري لخط النقل تتغير بصورة ملموسة مع مقاومية الارض. ممانعة التتابع الصفري تكون عادة بين 2 الى 3.5 بقدر ممانعة توالي التتابع الموجب X_1 ، بالنسبة لخطوط الدائرة الأحادية ، بما أن $\log_e \frac{D_e}{\sqrt[3]{(r_m D_m^2)}}$ بصورة عامة لايختلف كثيرا من $\log_e D_m/r$ (المعادلة [2.23]) . وستكون اقـل عندما يكون هناك سلك ارضـي مما لو لم يكن هناك حيث ان هذا يقلل D_e بصـورة مـؤثـرة ويميل لتقليل المجال المغناطيسي المتكون بوساطة التيار في موصلات الطور. فمثلا اذا كان هناك سلك ارضي غير مغناطيسي فان X_o ستكون حوالي $2X_1$ واذا لم يكن هناك سلك ارضي ستكون حوالي $3{\cdot}5X_1$. وبالنسبة لخطوط الدوائر الثنائية ستكون X_o حوالي $3X_1$ و $5{\cdot}5X_1$ على التعاقب لتلك الحالتين .

2.7 موصلات الخطوط المجدولة وذات القلب الفولاذي

Stranded and Steel-cored Line Conductors

لقد افترضنا في الفقرات المتقدمة أن موصلات الخطوط مكونة من جديلة واحدة من مادة غير مغناطيسية متجانسة . وستكون هذه الموصلات في الحقيقة غير متجانسة وغالبا ماتحتوي على الفولاذ. تستعمل في الواقع موصلات من النحاس متعدد الجدائل أو مـن الالمنيوم ذي القلب الفولاذي والذي هو الاكثر شيوعا ويتألف الاخير من جدائل فولاذية ملفوفة مع طبقات متبادلة ملولبة باتجاهات متعاكسة مكونة القلب الذي ستلف عليـه جدائل الالمنيوم بصورة مشابهة .

عندما يكون كل موصل طور متألفاً من عدد n من الفتائل او الجدائل غير المغناطيسية المتماثلة ، وكل منها يفترض ان يحمل التيار نفسه . عندئذ يكتب ترابط الفيض لـكل فتيلة ، آخذين معدل المحاثة لفتيلة واحدة ، ومن ثم نربطها جميعاً على التوازي لتعطي معدل المحاثة لـكل موصل طور والذي هو معطى بالمعادلة [2.23] .

من ناحية ثانية ، متوسط البعد الهندسي (م . ب . هـ) D_m يمكن كتابته الان بوصفه جذرا من الدرجة n^2 لحاصل ضرب المسافات من كل الفتائل n لموصل طوز واحد الى كل الفتائل n لموصل طور اخر. اذا كانت موصلات الاطوار الثلاثة ليست على زوايا مثلث متساوي الاضلاع ، فان اخذ جذر من الدرجة n^2 لكل زوج سوف يعطي ثلاث مسافات مختلفة و D_m ستكون الجذر التكعيبي لحاصل ضربها كالسابق .

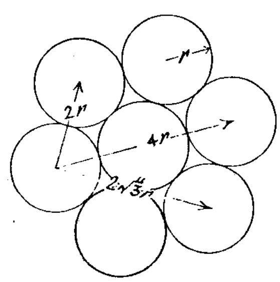
متوسط نصف القطر الهندسي (م . نق . هـ) او متوسط البعد الهندسي (م . ب . هـ) الذاتي بين الفتائل المكون للموصل ، سوف لايكون $r\,e^{-\frac{1}{4}}$ ، اي $0{\cdot}779\,r$ ، كما هي بالنسبة لجديلة غير مغناطيسية مفردة . بدلا من ذلك سيكون الجذر من الدرجة n^2 لحاصل ضرب كل الفتائل n في موصل واحد ، ذي م . نق . هـ $r_m = 0{\cdot}779\,r$ لكل جديلة ، مضروبا بالمسافات من تلك الجديلة الى كل الاخريات في الموصل .

وهذه موضحة بالنسبة لموصلات النحاس اوالالمنيوم ذات 7 جدائل المبينة في شكل 2.7 حيث ان م . نق . هـ . هو

$$r'_m = \sqrt[49]{[r_m(2r)^3(2\sqrt{3}r)^2 4r]^6[r_m(2r)^6]}$$
$$r'_m = r\sqrt[49]{2^{48}3^6 0{\cdot}779^7}$$
$$r'_m = 2{\cdot}177r$$

اي ان م . نق . هـ . لهذا الموصل سيكون $0{\cdot}7255 \times$ نصف القطر الكلي .

كلما ازداد عدد الجدائل فالنسبة تقترب من القيمة 0·779 والتي هي للموصل المصمت فمثلا النسبة لـ 3 جدائل تكون 0·678 ولـ 169 جديلة تكون 0·777 .



شكل 2.7 مقطع لموصل ذي سبع جدائل

محاثة قابلوات الألمنيوم ذات القلب الفولاذي تحسب أحياناً باهمال جدائل الفولاذ . أما اذا أخذت بنظر الأعتبار فيفترض في البداية أنها لاتحمل تياراً ومن ثم تصحح لتشمل التيار في الفولاذ وكذلك اللولبة ، مع نفاذية مفترضة . النتائج لمثل هذه الحسابات متوفرة في الجداول القياسية (مثلاً تلك المعطاة من قبل (Butterworth (1954)).

2.8 الموصلات الحزمية أو المتعددة Bundle or Multiple Conductors

التوسع في نظام الشبكة عند مستويات الفولتية العالية قاد الى استعمال الموصلات الحزمية حيث يكون لكل طور موصلان أو أكثر : فمثلاً منظومة 275-kV لها موصلان البعد بينهما 30cm وخطوط 400-kV لها أربعة موصلات لكل طور وتكون عند رؤوس مربع طول ضلعه 30-cm.
الموصلات الحزمية هذه اضافة الى تقليلها خسارة الهالة (corona) والتداخل مع المنظومات الأخرى كدوائر المواصلات فانها ستقلل المحاثة بسبب زيادة م . نق . هـ المؤثر أو متوسط البعد الهندسي الذاتي لكل طور . م . نق . هـ لكل من موصلات الألمنيوم ذات القلب الفولاذي يمكن حسابه كما مبين في الفقرة السابقة و م . نق . هـ المؤثر لكل طور يمكن ايجاده الآن بالطريقة نفسها . فمثلاً لو كان لكل طور موصلان ولكل منهما م . نق . هـ مقداره r'_m متر وهذان الموصلان مبعدان عن بعضهما بمسافة S متر . فأن م . نق . هـ سيكون $\sqrt{(r'_m S)}$. بما أن مقدار S يكون 15 - 20 مرة بقدر نصف قطر الموصل فأن م . نق . هـ يزداد بعامل مقداره حوالي 4 . واذا استعملنا اربعة موصلات لكل طور ووضعت عند رؤوس مربع طول ضلعه S فأن م . نق . هـ هو

$$= \sqrt[4]{(r'_m \times S \times S \times \sqrt{2}S)} \simeq 8r'_m.$$

محاثة التتابع الموجب لكل طور من خط له موصلان لكل طور يمكن الحصول عليها من المعادلة [2.23] وتكون

$$L = \frac{\mu_o}{2\pi} \log_e \frac{D_m}{\sqrt{(r'_m S)}} \text{ H/m} \qquad [2.25]$$

واذا افترضنا ان D_m تكون فعلياً مساوية لخط مناظر ذي موصل واحد لكل طور (يعني له مساحة المقطع الكلية نفسها) آنئذ سيكون للأخير محاثة مقدارها

$$\frac{\mu_o}{2\pi} \log_e \frac{D_m}{\sqrt{2}r'_m} \text{ H/m.} \qquad [2.26]$$

وبطرح [2.25] من [2.26] نحصل على

$$\frac{\mu_o}{2\pi}\log_e \frac{\sqrt{(r'_m S)}}{\sqrt{2}\, r'_m}$$

والتقليل ، نسبة مئوية من قيمة محاثة الموصل المفرد ، يكون

$$\frac{\log_e \dfrac{\sqrt{(r'_m S)}}{\sqrt{2}\, r'_m}}{\log_e \dfrac{D_m}{\sqrt{2}\, r'_m}} \times 100$$

حساب هذا التقليل لخط 275 kV له موصلان قطر كل منها 2 cm لكل طور مبعدين عن بعضهما بمقدار 30 cm ومعدل المسافة بين الأطوار مقدارهـــا 7 m ، يبين ان التقليل يكون حوالي 20% .

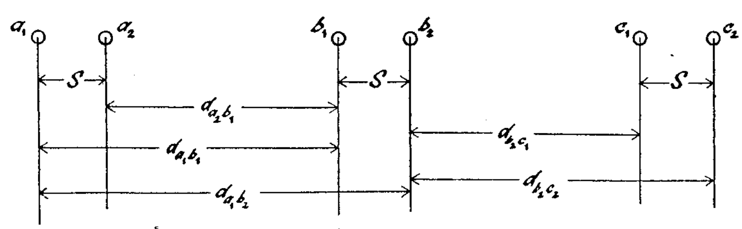
عند الحصول على المعادلة [2.26] افترضنا ان D_m لخط ذي موصلين لكل طور كانت نفسها كما أنها لخط ذي موصل واحد فقط لكل طور. هذا في الواقع مقارب جداً للحقيقة ، ولكن D_m تكون محسوبة كما يلي

$$D_m = \sqrt[3]{(d_{ab}d_{ac}d_{bc})}$$

حيث ان

$$d_{ab} = \sqrt[4]{(d_{a_1b_1}d_{a_1b_2}d_{a_2b_1}d_{a_2b_2})}$$
$$d_{ac} = \sqrt[4]{(d_{a_1c_1}d_{a_1c_2}d_{a_2c_1}d_{a_2c_2})}$$
$$d_{bc} = \sqrt[4]{(d_{b_1c_1}d_{b_1c_2}d_{b_2c_1}d_{b_2c_2})}$$

و $d_{a_1b_1}$ و $d_{a_1b_2}$ هما التباعد بين الموصلات للأطوار المختلفة و كما موضح في شكل 2.8 ، حيث انه للتبسيط تم تبيين الموصلات في مستوٍ أفقي واحد .



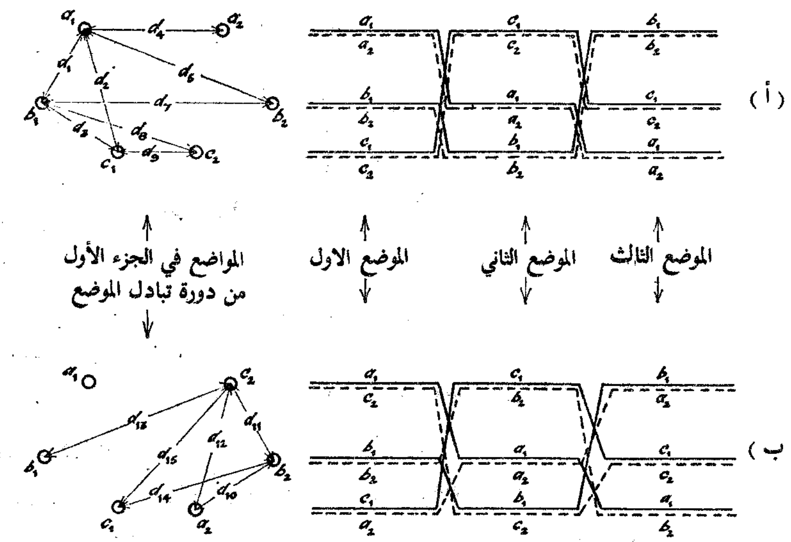
شكل 2.8 خط ذو دائرة أحادية له موصلان لكل طور في مستوٍ أفقي واحد

2.9 خطوط ثلاثة أطوار ثنائية الدائرة Double-circuit 3-phase Lines

ابراج النقل تحمل احياناً دائرتي ثلاثة أطوار تشتغلان على التوازي. اذا كان الخطان متباعدين الى الحد الذي يمكن فيه اهمال تأثير التبادل ، مثلاً موضوعان على برجين منفصلين يبتعدان بعضهما عن بعض مسافة كافية ، أوكانا مبدلي الموضع بصورة كاملة (هذا يعني ان الدائرة رقم 1 مبدلة الموضع بصورة كاملة الى مواضعها الثلاثة مع الدائرة رقم 2 في موضعها الأصلي ومن ثم الدائرة رقم 2 بدلت الموضع مرة واحدة وأتبعت بدورة تبديل موضع لدائرة رقم 1 وأتبعت بتبديل موضع آخر للدائرة رقم 2 فالدائرة الأولى مرة أخرى تبدل الموضع ثلاث مرات) ، آنئذ محاثة الدائرتين ستكون بالضبط نصف محاثة أي منهما على انفراد ، وبالتشابه ستكونً قيمة السعة ضعف تلك القيمة وبذلك سوف لايتم أنتقال قدره بين الدائرتين .

من ناحية أخرى فأن مبادلة موضع بتردد متساوٍ أكثر احتمالاً بالأستعمال لأنه ارخص وأسهل من مبادلة موضع بصورة كاملة . في هذه الطريقة كلا الدائرتين تبدلان الموضع سويةً أي أن التيار الذي كان في الموصل في موضع 1 (أنظر شكل 2.5) يجري لأطوال متتابعة متساوية في الموصلات في المواضع 2 ,1,3 ... الخ . بالتشابه فالتيارات في الموصلات الخمسة الأخرى تقدم أو تؤخر بمقدار 120° عند كل مبادلة موضع . كل طور من دائرة رقم 1 له وحسب الدورولأطوال متساوية مفاعلات ومقاومات ملائمة للمواضع a و b و c وكذلك يكون بالنسبة لأطوار الدائرة رقم 2 . وهكذا عند أي مضاعف لثلاثة تبديلات موضع تكون المفاعلات والمقاومات لكل الأطوار في أي دائرة واحدة متساوية .

اذا تبصرنا في الممانعة المتوالية لكل من الموصلات ضمن دائرة ثلاثية الطور غير مبدلة الموضع مفردة سنجد أنها تحتوي على حدود مقاومية ذات النمط $k \log_e d_{12}/d_{13}$ والتي تمثل أنتقال القدرة من طور واحد الى الآخر . من الواضح ان مجموع هذه الحدود في الأطوار الثلاثة سيكون صفراً . وبطريقة مشابهة فمقاومات أنتقال القدرة ستظهر في خطوط الدوائر الثنائية مالم يبادل الموضع بصورة كاملة .
كمية قليلة من القدرة ستنتقل من دائرة الى اخرى ومن المحتمل ان تزيد المحاثة وتقل السعة أو على العكس اعتماداً على أي من الطرق المتعددة للمباعدة ولمبادلة الموضع قد أتبعت .



شكل 2.9 طريقتان لمبادلة الموضع لخط ذي دائرة ثنائية

الموصلات a_1 و b_1 و c_1 هي الموصلات الثلاثة للدائرة رقم 1 و a_2 و b_2 و c_2 هي للدائرة رقم 2 . في الترتيب الموضح في شكل 2.9 (أ) الموصلات التي عند المستوي نفسه تكون دائما للطور نفسه . التماثل حول المستوي الشاقولي خلال مركز البرج يوضح ان الموصلات للطور نفسه ستكون لها تيارات وشحنات متشابهة . من جانب آخر اذا فصلنا موصلي كل طور عن بعضهما بأكبر مسافة ممكنة فمتوسط البعد الهندسي الذاتي r'_m لذلك الطور للخطين المشتغلين على التوازي سيزداد . اذا جعلنا المسافات بين مختلف الأطوار أقل مايمكن عندئذ سيقل متوسط المباعدة الهندسي D_m . كلا التأثيرين اللذين يقللان محاثة الخط يمكن احرازه بصورة افضل بوساطة الترتيب المبين في شكل 2.9 (ب) . لأي من الترتيبين المبينين في شكل 2.9 محاثة التتابع الموجب يمكن حسابها باستعمال المعادلة [2.23] اذا استعضنا عن D_m بتباعد مكافيء

$$D_{eq} = \sqrt[3]{(D_{ab}D_{bc}D_{ca})} \qquad [2.27]$$

واذا استعضنا عن r_m ب م . ب . هـ . الذاتي

$$r_{eq} = \sqrt[3]{(r_1r_2r_3)} \qquad [2.28]$$

حيث ان D_{ab} = متوسط التباعد الهندسي المتبادل بين الطورين a و b في الموضع 1 وهذا يعني للشكل 2.9 (أ)

$$D_{ab} = \sqrt[4]{(d_1d_5d_{11}d_{13})}$$

أو للشكل 2.9 (ب)

$$D_{ab} = \sqrt[4]{(d_1 d_5 d_8 d_{10})}.$$

وبالتشابه للطورين b و c في موضع 1 ، للشكل 2.9 (أ) ،

$$D_{bc} = \sqrt[4]{(d_3 d_8 d_{10} d_{14})}$$

أو للشكل 2.9 (ب)

$$D_{bc} = \sqrt[4]{(d_3 d_{11} d_{13} d_{14})}$$

وللطورين c و a في موضع 1 ، للشكل 2.9 (أ) ،

$$D_{ca} = \sqrt[4]{(d_2 d_6 d_{12} d_{15})}$$

أو للشكل 2.9 (ب) ،

$$D_{ca} = \sqrt[4]{(d_2 d_4 d_9 d_{12})}.$$

وهكذا للشكل 2.9 (أ) ،

$$D_{eq} = \sqrt[12]{(d_1 d_2 d_3 d_5 d_6 d_8 d_{10} d_{11} d_{12} d_{13} d_{14} d_{15})} \qquad [2.29]$$

أو للشكل 2.9 (ب) ،

$$D_{eq} = \sqrt[12]{(d_1 d_2 d_3 d_4 d_5 d_8 d_9 d_{10} d_{11} d_{12} d_{13} d_{14})}. \qquad [2.30]$$

اذا كانت مجموعتا مواضع الموصل متماثلة حول خط المركز الشاقولي للبرج كما هو المعتاد فعندئذٍ تقل التعابير الرياضية أعلاه ، للشكل 2.9 (أ) ، الى

$$D_{eq} = \sqrt[6]{(d_1 d_2 d_3 d_5 d_6 d_8)} \qquad [2.31]$$

أو للشكل 2.9 (ب) ،

$$D_{eq} = \sqrt[12]{(d_1^2 d_2^2 d_3^2 d_4 d_5^2 d_8^2 d_9)}. \qquad [2.32]$$

يجب ان يلاحظ ان D_{eq} لها القيمة نفسها لكل حالة في الموضعين الآخرين 2 و 3 من دورات مبادلة الموضع المبينة في شكل 2.9 .

اذا كان م . ب . ه الذاتي أو م . ق . ه لموصل هو r'_m عندئذٍ للطور a المتألف من موصلين a_1 و a_2 ، وفي الموضع الأول لدورة مبادلة الموضع ، يكون م . ب . ه الذاتي من الشكل 2.9 (أ) ،

$$r_1 = \sqrt{(r'_m d_4)}$$

أو من الشكل 2.9 (ب) ،

$$r_1 = \sqrt{(r'_m d_6)}$$

وبالتشابه في الموضع 2 من دورة مبادلة الموضع ، م . ب . ه الذاتي للطور a ، لكلا الشكلين 2.9 (أ) و (ب) ، يكون

$$r_2 = \sqrt{(r'_m d_7)}$$

وللموضع 3 ، يكون م . ب . ه الذاتي لطور a ، في شكل 2.9 (أ) ،

$$r_3 = \sqrt{(r'_m d_9)}$$

أو لشكل 2.9 (ب) ،

$$r_3 = \sqrt{(r'_m d_{15})}.$$

لذلك

$$r_{eq} = \sqrt[3]{(r_1 r_2 r_3)}$$

لشكل 2.9 (أ) .

$$r_{eq} = (r'_m)^{\frac{1}{2}} \sqrt[3]{(d_4^{\frac{1}{2}} d_7^{\frac{1}{2}} d_9^{\frac{1}{2}})} \quad [2.33]$$

أو لشكل 2.9 (ب) .

$$r_{eq} = (r'_m)^{\frac{1}{2}} \sqrt[3]{(d_6^{\frac{1}{2}} d_7^{\frac{1}{2}} d_{15}^{\frac{1}{2}})} \quad [2.34]$$

وهذه القيم تنطبق بالتساوي على الموضعين 2 و 3 من دورة مبادلة الموشع .

تبصر في خط 132-kV ذي تماثل حول المستوي الشاقولي و $d_1 = 4.25$ m و $d_2 = 7.75$ m و $d_3 = 3.75$ m و $d_4 = 7.5$ m و $d_5 = 9.3$ m و $d_6 = 11.4$ m و $d_7 = 9.3$ m و $d_8 = 9.15$ m و $d_9 = 7.5$ m . الترتيب في شكل 2.9 (أ) يعطي المحاثة والتي هي حوالي 3 الى 4 % أكثر منها فيما لو كانت الدوائر على أبراج منفصلة وتبتعد بعض الشيء عن بعضها . وتلك في شكل 2.9 (ب) تعطي تقليلاً مقداره 3 الى 4 % في المحاثة . الترتيب في شكل 2.9 (ب) هو الأكثر استعمالاً من ذاك الذي في شكل 2.9 (أ) . بحيث أن المفاعلة الحثية لخطين على التوازي على البرج نفسه تكون على الأغلب حوالي 4 % أقل من نصف المفاعلة لخط واحد لوحده .

مسائل

1 . خط 132-kV ثلاثي الطور ذو حمل متوازن له موصلات مصمته ذات قطر 2 سم والمسافة بين مراكزها هي 3·65 و 5·5 و 8·2 متر علماً بأنها مبدلة الموضع على طول مسارها . احسب محاثة التتابع الموجب لكل موصل / كم .

(1.3mH)

2 . خط نقل ثلاثي الطور 50-Hz طوله 16 كم وله موصلات مصمته ذات قطر 2·5 سم مع متوسط تباعد هندسي مقداره 4·2 سم . يمكن اعتبار الخط على أنه مبدل الموضع . احسب فولتية نهاية الأرسال عند نقل حمل مقداره 100,000 kVA ذي عامل قدرة متأخر مقداره صفر وعند فولتية 132 kV . أهمل مقاومة الخط وسعته .

(جامعة ليدز) (136·4 kV)

3 . أثبت أن م . نق . هـ . لموصل مجوف ذي نصف قطر داخلي r ونصف قطر خارجي R يكون $R\,e^{-K\mu_c}$ حيث أن μ_c هي النفاذية النسبية لمادة الموصل و

$$K = \frac{(R^4/4) - R^2 r^2 + (3r^4/4) + r^4 \log_e R/r}{(R^2 - r^2)^2}$$

4 . احسب المفاعلة الحثية / كم للتتابع الصفري لكل موصل من خط علوي معلق ثلاثي الطور 50 Hz مبدل الموضع له موصلات مصمته ذات نصف قطر 1 سم المسافات بين مراكز الموصلات هي 7·25 و 3·9 و 6·4 متر وعمق الموصل الأرضي المكافيء هو 935 متر .

(جامعة ليدز) (1·38Ω)

5 . خط نقل ثلاثي الطور 50-Hz له موصلات تتألف من 12 جديلة من الألمنيوم ملفوفة حول لب فولاذي ذي سبع جدائل . كل جديلة ألمنيومية أو فولاذية لها قطر مقداره 0·28 سم . متوسط التباعد الهندسي بين موصلات الأطوار هو 6·1 متر . عامل الخط وكأنه مبدل الموضع . اعتبر أن الموصلية الكهربائية للفولاذ هي 16 % من تلك للألمنيوم وأننا استعملنا طبقات مجدولة . الجداول تبين أن المفاعلة الحثية لكل موصل من هذا الخط هي 0·525Ω/km .
احسب نسبة الخطأ المئوية التي يمكن أن تنشأ فيما لو حسبنا هذه المحاثة بدلاً من أن نفترض أن جدائل الفولاذ لاتحمل أي تيار .

(−17%)

6 . خط نقل قدره أحادي الطور 50-Hz له موصلات تبتعد عن بعضها بمسافة 3·05 متر ولها الأرتفاع نفسه عن الأرض . موصلا دائرة هاتف يبتعدان عن بعضهما

بمسافة 0·61 متر ولكليهما الأرتفاع نفسه عن الأرض ولكنهما يقعان تحت خط القدرة ويبعدان عنه بمسافة 3·05 متر. المسافة الأفقية بين المستوي الوسطي لخط القدرة والمستوي الوسطي لخط الهاتف هي 6·1 متر. اذا كان الخطان يسيران على التوازي لمسافة كيلومتر واحد فاحسب فولتية التردد 50-Hz المحتثة في دائرة الهاتف عندما يحمل خط القدرة تيارا مقداره 500 A.

(5.1 **volt**)

7. خط نقل قدرة ثلاثي أطوار 50-Hz له موصلات تقع عند زوايا مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه 3·05 متر. الموصلان الواطئان لهما الأرتفاع نفسه فوق الأرض ويعلوان بمسافة 3·65 متر فوق موصلي خط هاتف. الموصلان الآخران يبعدان عن بعضهما بمسافة 0·61 متر. اذا كان الخطان يسيران على التوازي لمسافة كيلومتر واحد. أحسب فولتية التردد 50-Hz المحتثة في دائرة الهاتف عندما يحمل خط القدرة تياراً مقداره 500 A.

(3·15 volts)

8. خط نقل ثلاثي الطور له موصلان لكل طور مرتبة كما مبين في شكل 2·8 وذات $S = 30{\cdot}5$ cm ويبتعد خط المركز لطور b مسافة 6·1 متر عن خطي مركز الطورين a و c.
كل موصل يمكن اعتباره وكأنه مكافيء لنحاس مصمت ذي قطر 2·54 سم.
احسب معدل المحاثة / متر لكل طور.

($9{\cdot}86 \times 10^{-7}$ H/m)

9. ملف لولبي ملفوف على اطار طويل مربع المقطع ولا يحتوي على مادة مغناطيسية. تم ثنيه بشكل حلقي بحيث أصبح نصفا قطرية الداخلي والخارجي r_1 و r_2.
أمررنا قابلواً مستقيماً نحيفاً ذا طول محدود على طول المحور الحلقي وبزوايا قائمة الى مستوية. برهن على أن المحاثة المشتركة بين القابلو والملف اللولبي هي

$$M = \mu_o n \frac{(r_2^2 - r_1^2)}{2} \log_e \frac{r_2}{r_1} \text{H}$$

حيث أن n = متوسط عدد اللفات / متر.
أحسب الق. د. ك. الذروة المحتثة في الملف اذا كان $r_1 = 0{\cdot}09$ metre و $r_2 = 0{\cdot}11$ metre و $n = 1000$ والتيار الجيبي في القابلو له قيمة ذروة

مقدارها 1000 A عند 50-Hz .

(جامعة ليدز) (0·1575 volts)

(هذا الترتيب للملف الحلقي حول موصل يعرف بملف روكوسكي Rogowski coil ويتم استعماله احيانا لقياس التيار) .

10 . خط نقل ثلاثي الطور يحمل تيارات ثلاثية الطور متوازنة يتألف من ثلاثة موصلات متوازية تبعد عن بعضها بمسافات متساوية . برهن على أنه سيكون هناك مجال مغناطيسي دوارنقي عند نقطة تبعد بمسافات متساوية عن كل الموصلات الثلاثة وأوجد تعبيراً رياضياً لقوة المجال وللسرعة الزاوية لدورانه .

أوجد قيمة قوة المجال المغناطيسي عندما يكون التباعد بين الموصلات 1 متر وعندما يحمل الخط 18 MVA عند فولتية خط مقدارها 33 kV .

(L.C.T.) ($\phi = 1{\cdot}5\Phi_{max}\, e^{-j\omega t}$ حيث أن Φ_{max} هو الفيض الذروة بسبب موصل واحد وتردد المصدر $\omega = 2\pi \times$. 184·5 A/m) .

الفصل الثالث

سعة خط النقل

TRANSMISSION LINE CAPACITANCE

3.1 مقدمة

موصلا خط معلق بينهما هواء بوصفه عازلاً يكونان سعة ، تأخذ عند ربطها الى مصدر فولتية متناوب تيار شحن . هذا التيار سيجري حتى في ظروف اللاحمل . تيار الشحن هذا سيأخذ القيمة العظمى عند نهاية الأرسال ويضمحل الى الصفر عند نهاية الأستلام . والسعة تعد حملاً ذا عامل متقدم على الخط وتأثير هذا على تأدية الحالة المستقرة للخط قد تمت مناقشته في الفصل 1 .

تركيب الخط قد يتألف مثلاً من خط ذي دائرة ثنائية ذات موصلين / طور بحيث يكون هناك أثنا عشر موصلاً مع سلك (أو سلكين) بوصفه ارضياً هوائياً والأرض نفسها والكل يؤلف منظومة سعة معقدة مكونة من سعات بين ازواج من موصلات الخط وبين موصلات الخط والأرض . مهما تكن درجة التعقيد من الممكن الحصول على السعة المؤثرة نسبة الى الأرض والمباديء الرئيسية المستخدمة في هذا التقليل ستناقش في هذا الفصل . بصرف النظر عن دورها في اشتغال الحالة المستقرة للخط كما نوقشت في الفصل 1 . هذه السعة المؤثرة الى المحايد لها أهمية رئيسية تحت ظروف الحالة العابرة . مثل الفولتيات المفرطة الناشئة عند فتح أو غلق قاطع دورة مربوط الى خط غير محمل طويل أو عندما تحدث أمواج منتقلة للفولتية في الخطوط بسبب صاعقة مثلاً (أنظر الجزء 2) .

لقد تم رسم خطوط الفيض الكهربائي لموصلين متوازيين طويلين لهما شحنات متساوية ومتعاكسة في شكل 3.1 مساعدة في تصور توزيع المجال الكهربائي بين

موصلي خط مشحونين .كل زوج في خطوط الفيض يحتوي على كمية محدودة من الفيض الـكهربائي بحيث أنه لأية نقطة في المجال من الممكن تعيين كمية متجهة **D** تمثل كثافة الفيض الكهربائي .

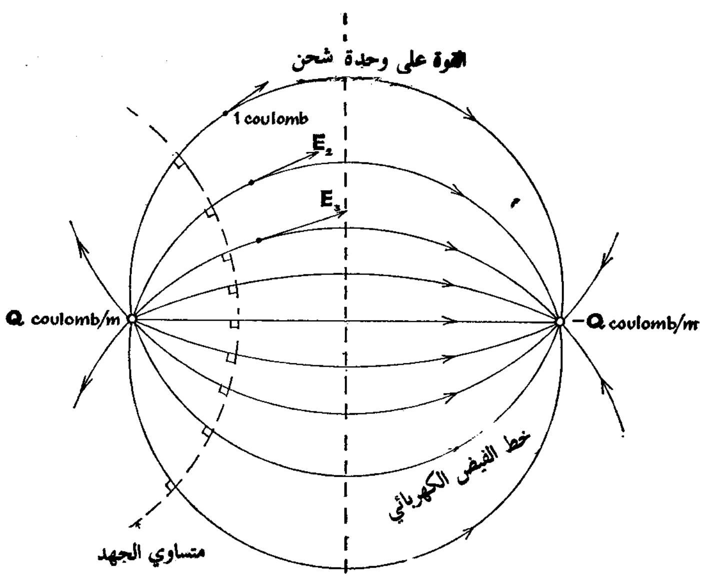
عند هذه النقطة من الضروري ان نعلق على الترميز المستعمل للمتجهات (اي الكميات التي تتغير في المقدار والاتجاه طبقا للموضع في الفضاء المتبصر به) والمطاورات (اي الـكميات التي تتغير مع الزمن . ويعتبر التغير هنا جيبيا بسيطا الااذا نص على غير ذلك) . في هذا الفصل وفي الحقيقة خلال كل هذا الـكتاب سنتعامل مع فولتيات وتيارات متناوبة وليست مستمرة . بما اننا سوف لاناقش اية مركبات d.c لمنظومة القدرة (باستثناء القابلوات . فقرة 5.9) . الحروف الغامقة تشير الى قيمة ج . م . ت (جذر متوسط التربيع) لكمية تتغير جيبيا مع الزمن . مثلا I .وتبين انها في هذا السياق يجب ان تعامل على انها مطاور عندما تبين بحروف مائلة . منلا I . يكون المقدار لكمية ج . م . ت مهما فقط (هذا يجب أن لايختلط مع الأتساع أو قيمة الذروة للكمية المتناوبة . أي $I\sqrt{2}$) . بما أن الشحنات في المنظومة تنشأ من فولتيات متناوبة فهي أيضاً ستكون جيبية والمتجهات الممثلة لكثافة الفيض الكهربائي والقوة الكهربائية ستكون أيضاً متغيرة جيبياً مع الزمن . لذلك فالعلامات المستعملة في هذه الحالة للمتجهات الفضائية مبينة بحروف غامقة كذلك . مثل **D** و **E** . كما يجب أن نتذكر أنها تتغير مع الزمن كما انها تتغير في الفضاء . (المعادلات التي تتبع في هذه الفقرة تكتب على الأعم . مثلا المتون حول الـكهرومغناطيسية. بدلالة الكميات اللحظية واللامتجهة . مع ذلك تم استعمال الأحرف الغامقة هنا لأنها ضرورية لتكوين المعادلات في الفقرات اللاحقة للعمل بالكميات المتناوبة .)

نظرية كاوس (Gauss) تنص على أنه في أي لحظة من الزمن يكون الفيض الكهربائي الكلي خلال أي سطح مغلق A مساوياً للشحنة الكلية المحاطة بذلك السطح أي أنه اذا كانت $\mathbf{D}_n$ هي كثافة الفيض المتعامدة على عنصر من سطح ذي مساحة $\mathrm{d}a$ فان

$$\int_A \mathbf{D}_n\, \mathrm{d}a = \Sigma \mathbf{Q}$$

حيث أن $\Sigma \mathbf{Q}$ هي المجموع الصافي لكل الشحنات المحاطة بالسطح .كثافة الفيض الكهربائي **D** بناء على ذلك يمكن قياسها بالكولومب / م²

عند أي نقطة في المجال الكهربائي هناك جهد ✓ لامتجه (أي القيمة التي لاتتغير مع الأتجاه بحيث أن له مقداراً فريداً عند أي نقطة معطاة في المجال) نسبة الى مرجع اسناد ذي جهد صفر. وبما ان الجهد يتغير جيبياً مع الزمن فقيمة جـ . م . ت . له ستكون V. فرق الجهد بين نقطتين يعرف بأنه الشغل المنجز بالجول لنقل شحنة موجبة مقدارها كولومب واحد من نقطة معينة باتجاه نقطة أخرى مشحونة موجباً أكثر وضد قوة المجال الكهربائي. مرجع الأسناد ذو الجهد صفر من الممكن اختياره اعتباطياً. مثلاً الجهد عند اللانهاية. وفي عمل خط نقل القدرة. يؤخذ على أنه الأرض والتي تفترض لهذا الغرض أنها ذات توصيل تام وينجز الشغل عند تحريك الشحنة ضد القوة E والتي هي كمية متجهة مقاسة بالفولت / م. ويمكن ان تدعى بالقوة الكهربائية. اوشدة المجال الكهربائي أو تدرج الجهد. لأن $E_x = -\partial V/\partial x$ وحيث ان ∂x هي جزء ضئيل من المسافة. الأشارة السالبة هي نتيجة للحقيقة أنه اذا ازدادت x بالابتعاد عن موصل ذي شحنة موجبة. فان الجهد يقل بحيث ان $\partial V/\partial x$ تكون سالبة عندما E تكون موجبة. نظراً لأن الشحنة الموجبة تسلط عليها قوة باتجاه معاكس للموصل ذي الشحنة الموجبة.



شكل 3.1. المجال الكهربائي بين موصلي خطين

كما موضح في شكل 3.1 ، مقدار واتجاه E يتغير من نقطة الى نقطة في المجال . تكامل المعادلة أعلاه يعطي $V = \int E\,\partial x$ والتي تعرف الجهد بدلالة الشغل المنجز. ستكون هناك خطوط عليها الجهد نفسه عند أي لحظة واثنان من هذه الخطوط ، تدعى بالمتساوية الجهد ، مبينة في شكل 3.1 . هذان الخطان يعبران خطوط المجال عند 90° .

عند أي نقطة في المجال $\epsilon = D/E$ حيث ان $\epsilon = \epsilon_o \epsilon_r$ و

$$\epsilon_o = 1/(36\pi 10^9) = 8{\cdot}854 \times 10^{-12}\ \mathrm{F/m}$$

وتعرف بأنها السماحية للفضاء الحر، أو الثابت الكهربائي الأبتدائي . ϵ_r هي خاصية ليست لها أبعاد للوسط الذي يختبر فيه المجال الكهربائي وتعرف بالسماحية النسبية أو ثابت العازل. للفراغ $\epsilon_r = 1{\cdot}0$ وللهواء عند درجة حرارة وضغط اعتيادي يكفي لأغلب الأغراض أخذ ϵ_r على أنها واحد .

اذا كان لموصل مستقيم طويل مفرد ذي نصف قطر r متر في الهواء شحنة Q كولومب / متر طول موزعة بانتظام على سطحه آنئذ يمكن تصوره سطحاً اسطوانياً ذا نصف قطر (x) متر ($x>r$) عند موضع بعيد عن نهاياته ليكون متحد المحور مع الموصل . بما ان متجه كثافة الفيض عند x هو D_x يكون عرضيا وعموديا على السطح وثابتاً فوقه ، فاذاً

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x}\ \mathrm{C/m^2}$$

و

$$E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o x}\ \mathrm{V/m} \qquad [3.1]$$

$$= -\frac{\partial V}{\partial x}.$$

وبالتكامل نحصل على

$$V = \frac{-Q}{2\pi\epsilon_o}\log_e x + K \qquad [3.2]$$

حيث ان K هو ثابت اختياري يعتمد على اختيار قيمة x التي عندها يكون الجهد صفرا .

اذا كان هناك عدد من الموصلات المتوازية المستقيمة الطويلة في الهواء ، وعلى اساس

أن شحناتها يمكن ان تفترض موزعة بأنتظام على سطوحها (هذا يعني ان مسافاتها من بعضها ومن الارض هي كبيرة مقارنة بأنصاف اقطارها) ، فان الجهد عند نقطة تبعـد بمسافة $x_1, x_2, x_3,$ ..الخ من محاور الموصلات التي تحمل شحنات خط Q_1 و Q_2 و Q_3 ...الخ / وحدة طول يمكن ان يكتب من المعادلة [3.2] كما يلي

$$V_x = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_1 \log_e x_1 + Q_2 \log_e x_2 + Q_3 \log_e x_3 + \ldots] + K. \qquad [3.3]$$

وبالتشابه فالجهد عند نقطة اخرى تبتعد بمسافة $y_1, y_2, y_3,$ و..الخ من شحنات الخط يكون

$$V_y = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}[Q_1 \log_e y_1 + Q_2 \log_e y_2 + Q_3 \log_e y_3 + \ldots] + K,$$

أي أن جهد x نسبة الى y يكون

$$V_{xy} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_1 \log_e \frac{y_1}{x_1} + Q_2 \log_e \frac{y_2}{x_2} + Q_3 \log_e \frac{y_3}{x_3} + \ldots\right]. \qquad [3.4]$$

3.2 خط ذو سلكين Two-wire Line

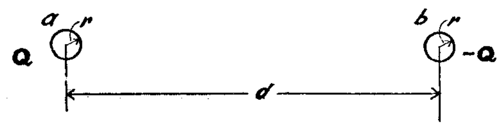
اذا كان هناك موصلان فقط يحملان الشحنتين $Q+$ و $Q-$ على التوالي فعندئذ تعطي المعادلة [3.3] الجهد عند اي نقطة في المجال تبعد x_1 و x_2 من الشحنتين وكما يلي

$$V = -\frac{1}{2\pi\epsilon_o}(Q \log_e x_1 - Q \log_e x_2) = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{x_2}{x_1}. \qquad [3.5]$$

عند اللانهاية $x_1 = x_2$ و $V = 0$ ولذلك $K = 0$.

في المعادلة [3.5] x_1 و x_2 يجب ان تكونا اكبر من انصاف اقطار الموصلات الفعلية . لانه عندما تكون x_1 أو x_2 اقل من نصف القطر r للموصلات يكون الجهد ثابتا . في حين أن [3.5] تعطيه بوصفة متغيرا واذا كانت $x_1 = 0$ فالجهد قد جعل ليظهر وكأنه لانهائي . المعادلة [3.5] تمكننا من رسم الشكل 3.1 . الخطوط المتساوية الجهد تكون

وكأنها x_2/x_1 = ثابتاً ، وخطوط الفيض تكون عمودية على الخطوط المتساوية الجهد (منظومة متعامدة) . الموصلات لايمكن اخذها بوصفها شحنات خطوط ذات انصاف اقطار متناهية الصغر لان المعادلة (3.5) تطبق فقط عندما تكون $x > r$. في شكل 3.2 ، الموصلان الطويلان المتوازيان a و b ، كل منهما ذو نصف قطر r متر مبينان على ان محوريهما يبتعدان عن بعضهما بمسافة d متر .



شكل 3.2. خط ذو سلكين

اذا كانت هناك شحنة مقدارها Q على a فقط ولاتوجد شحنة على b وكانت b متناهية الرقة ، فالجهود المتساوية ستكون دوائر متحدة المركز مع محور a. الموصل المعدني b ذو نصف القطر المحدود r يشوش المجال لانه يُدْخِل منطقة عرضها $2r$ بين الخطــوط المتساوية الجهود والتي تكون كلها ذات جهد واحد . هذا الجهد من الممكن ان يؤخذ بانه ذلك الخط المتساوي الجهد الدائري الذي يسيمر من خلال محور الموصل b فيما لو رفع مــن المجال او جعل متناهي الرقة . وعند مسافة عدة انصاف اقطار من الموصل المحدود فــأن متساوي الجهد هذا سيصبح دائرة متحدة المركز مع محور a وتبتعد عنه بمسافـــــة d .

بما ان فرق الجهد بين نقطتين يكون مساويا الى الشغل المنجز في تحريك وحدة شحنة من احدى النقطتين الى الاخرى فانه لايعتمد على الطريق المأخوذ في المجال بين النقطتين . لذلك ففرق جهد (ف . ج .) a نسبة الى b سيكون V_{ab} . والذي يمكن ايجاده بأخذ تكامل المعادلة [3.1] بين سطح الموصل a حيث أن $x = r$ الى $x = d$ للشحنـة Q مع اضافة المساهمة المشابهة من الشحنة $-Q$ على الموصل b بدلا عن ذلك . فمن المعادلة [3.5] وبجعل $x_1 = r$ و $x_2 = d,$ يكون فرق جهد a . هو V_a بسبــب شحنته $+Q$/ وحدة طول و $-Q$ على b وكما معطى بالمعادلة التالية

$$V_a = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{d}{r} \qquad [3.6]$$

وجهد b . V_b بسبب كلا الشحنتين سيكون

$$V_b = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{r}{d}$$

لذلك

$$V_{ab} = V_a - V_b = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{d^2}{r^2}$$
$$= \frac{Q}{\pi\epsilon_o} \log_e \frac{d}{r}. \qquad [3.7]$$

وهذه هي القيمة المعطاة بالمعادلة [3.4] اذا كانت x_1 ، مسافة الموصل a من شحنته هي نصف قطره ، و y_2 مسافة الموصل b من شحنته هي نصف قطره . السعة C / مترطول بين الموصلين تكون

$$C = \frac{Q}{V_{ab}} = \frac{\pi\epsilon_o}{\log_e d/r} \text{ F/m} \qquad [3.8]$$

هناك تقريبات عديدة مشتملة في تطبيق المعادلة [3.8] على خط نقل فعلي وهي
(أ) توزيع الشحنة على سطح موصل الخط قد أفترضت على أنها منتظمة ، وهذا سيكون حقيقياً على وجه الدقة فقط عندما تكون كل الاجسام المشحونة الاخرى قد ابعدت الى مالانهاية ، اي ان الخط يصبح اقل عندما تزداد النسبة d/r . لخطوط النقل ذات الفولتية العالية غالبا ماتكون نسبة المسافة لاقرب موصل الى نصف قطره بحدود 300 الى 400 والخطأ في السعة سيكون صغيرا الى حد الاهمال ، فمثلا بالنسبة لخط ذي سلكين وبدون موصلات اخرى أو ارضي،المعادلة [3.8] يجب ان تبدل على وجه التحديد بالمعادلة

$$C = \frac{\pi\epsilon_o}{\log_e [d/2r + \sqrt{(d^2/4r^2 - 1)}]},$$

ولكن ستيفنسن (Stevenson (1962)) استشهد ببيانات مبينا كيف ان الخطأ يزداد كلما قلت d/r . اذا اخذنا أسوأ حالة بأخذ d الدنيا و r القصوى ، مثلا $d = 0{\cdot}63$ m و $r = 0{\cdot}63$ cm فستكون $d/r = 100$ ويكون الخطأ اذا استعملنا المعادلة [3.8] 0·002 % فقط .

(ب) المسافة d بين مركزي الموصلين قد استعملت على انها أحد حدي التكامل بدلا من ($d-r$) ، والتي يمكن تبريرها ، مرة اخرى ، عندما $d \gg r$.

(ج) نصف القطر الاجمالي الفعلي لموصل مجدول يمكن استعماله بديلا عن r الذي استعملناه على انه نصف قطر لموصل اسطواني املس . وبما ان الاضطراب في المجال الكهربائي بسبب الجدل يحدث قريبا جدا من الموصل ، فهذا التقريب مسوغ مرة اخرى

عند حساب سعة الخط ، بالرغم من ان الجدل يؤثر على نشوء الهالة (corona) (فقرة 3.8).

نقترح على الطالب ان يشتق معادلة للسعة بين موصلات الشكل 3.2 مفترضا ان لها انصاف اقطار مختلفة r_1 و r_2 والتي ستبين انه في المعادلة [3.8] r ستبدل الى $\sqrt{(r_1 r_2)}$.

السعة تتناسب مع طول مسار الخط بحيث ان المفاعلة السعية تتناسب عكسيا مع الطول ولذلك لايمكن التعبير عنها بالاوم / كيلومتر. بدلا عن ذلك فالتقبلية السعية يمكن ان تستعمل وتقاس بال siemens/km.

3.3 منظومة متعددة الموصلات عامة

General Multi-conductor System

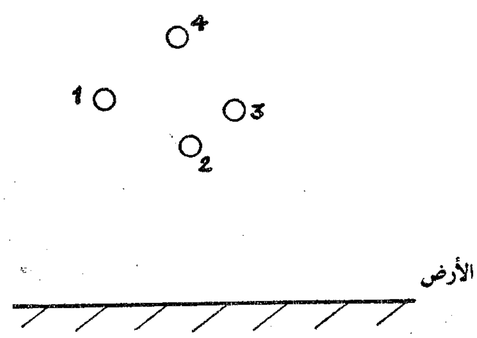
تبصر في عدد من الموصلات المفردة التي تسير متوازية وموازية لمستوٍ أرضي ذي توصيل تام كما مبين في شكل 3.3 (منظومات موصلات الحزمة ، حيث يكون لكل طور أكثر من موصل واحد ستناقش في الفقرة(3.9) . جهد الأخيرة ، أي الارض ، يمكن أن يؤخذ على أنه صفر ، واذا كانت الموصلات غير مشحونة ابتداءً فهي كذلك ذات جهد صفر . اذا أخذنا شحنة Q_1 من الارض الى الموصل 1 فعندئذٍ سيكون جهد كل الموصلات متناسباً مع Q_1. بكتابة p ثابت تناسب يكون جهد الموصل 1 نسبة الى الارض هو $V'_{10} = p_{11}Q_1$, ، بينما ستكونُ جهود كل الموصلات الأخرى نسبة الى الارض هي $V'_{20} = p_{21}Q_1$ و $V'_{30} = p_{31}Q_1$ وهكذا . وحدات p ستكون فولت / كولومب أي إنه مقلوب السعة .

بالتشابه اذا نقلنا Q_2 من الأرض الى الموصل 2 فجهد الموصل 1 نسبة الى الأرض سيرتفع بـ $V''_{10} = p_{12}Q_2$, وجهد الموصل 2 نسبة الى الأرض سيرتفع بـ $V''_{20} = p_{22}Q_2$ وهكذا الذلك اذا نقلنا الشحنات Q_1 و Q_2 و Q_3 و Q_4 بالتتابع من الارض الى الموصلات 1 و2و3و4 حينئذٍ بوساطة التراكب سترتفع جهود الموصلات نسبة الى الارض الى

$$\begin{aligned} V_{10} &= p_{11}Q_1 + p_{12}Q_2 + p_{13}Q_3 + p_{14}Q_4 \\ V_{20} &= p_{21}Q_1 + p_{22}Q_2 + p_{23}Q_3 + p_{24}Q_4 \\ V_{30} &= p_{31}Q_1 + p_{32}Q_2 + p_{33}Q_3 + p_{34}Q_4 \\ V_{40} &= p_{41}Q_1 + p_{42}Q_2 + p_{43}Q_3 + p_{44}Q_4 \end{aligned}$$

سنرى انه من الضروري كتابة المعادلة الاولى فقط حيث ان الاخريات يمكن الحصول عليها بتغيير الترميز في كل ترميز سفلي ثنائي . الترميز بالمصفوفة يمكن من كتابة المعادلات بهيأة متضامّة اكثر وكما يلي

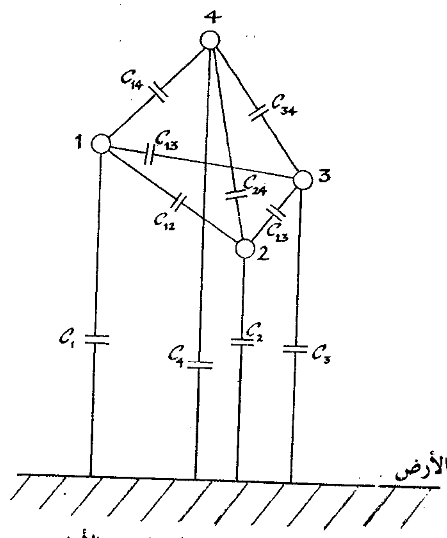
$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ p_{41} & p_{42} & p_{43} & p_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} \qquad [3.9]$$



شكل 3.3 منظومة متعددة الموصلات عامة لها أربعة موصلات فقط

المعاملات p تكون ثوابت لشكل عام لوضعية عامة معطاة لأنها تعتمد فقط على هندسة الموصلات والمستوي الأرضي . وهذا يمكن أن نراه بمقارنة المعادلة [3.9] مع المعادلة [3.4] . اذا قلبنا مصفوفة معاملات p في المعادلة [3.9] (أي أنه تم حل المعادلات لكي تعطي Q بدلالة V) ، فسنحصل على مجموعة معاملات أخرى والتي مرة أخرى يجب أن تكون معتمدة فقط على حجم وموضع الموصلات . هذه المعاملات الجديدة ستكون لها وحدات سعة .

$$\begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \\ Q_3 \\ Q_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & c_{13} & c_{14} \\ c_{21} & c_{22} & c_{23} & c_{24} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{34} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{20} \\ V_{30} \\ V_{40} \end{bmatrix} \qquad [3.10]$$



شكل 3.4 السعات بين الموصلات والأرض

بما أن الطاقة المخزونة في المجال الـكهربائـي عندما يتم نقل هذه الشحنات سوف لاتعتمد على الترتيب الذي انجر به الشغل لتحريك هذه الشحنات ، عندئـــذ $p_{12} = p_{21}$ و $c_{12} = c_{21}$، اي ان المصفوفات في [3.9] و[3.10] تكون متماثلة حول القطر المتقدم (الأيسر الاعلى الى الايمن الاسفل) . لموصلات الخط الثلاثة ، اي لخط ثلاثة اطوار ذي دائرة مفردة مع موصل أرضي ، يمكن اعادة كتابة المعادلة الاولى في [3.10] كما يلي :

$$\mathbf{Q}_1 = (c_{11}+c_{12}+c_{13}+c_{14})\mathbf{V}_{10} - c_{12}(\mathbf{V}_{10}-\mathbf{V}_{20}) - c_{13}(\mathbf{V}_{10}-\mathbf{V}_{30}) - c_{14}(\mathbf{V}_{10}-\mathbf{V}_{40})$$

$$\mathbf{Q}_1 = C_1\mathbf{V}_{10} + C_{12}\mathbf{V}_{12} + C_{13}\mathbf{V}_{13} + C_{14}\mathbf{V}_{14} \qquad [3.11]$$

حيث أن

$$C_1 = (c_{11}+c_{12}+c_{13}+c_{14})$$

و

$$C_{12} = -c_{12}.$$

وبالتشابه

$$\mathbf{Q}_2 = C_{12}\mathbf{V}_{21} + C_2\mathbf{V}_{20} + C_{23}\mathbf{V}_{23} + C_{24}\mathbf{V}_{24}$$

حيث أن

$$C_2 = (c_{21}+c_{22}+c_{23}+c_{24})$$

وبالتشابه يمكن كتابة Q_3 و Q_4 على هذا النمط . هذه المعادلات الاربع هـــي لتلك المنظومة من السعات المبينة في شكل 3.4. الموصل 1 مثلاً ستكون شحنته مؤلفة من اربع مركبات في [3.11] المركبة الأولـى هـي ف . ج . بين الموصـــل نفسه والارض مضروباً بسعة C_1 الى الأرض ، وثلاث مركبات كل منها هو حاصـــل ضرب ف . ج . بين الموصل نفسه وموصل آخر مضروباً بالسعة بين هـــذين الموصلين .

3.4 تأثير الأرض Effect of Earth

اذا ادخلنا صفيحة موصلة رقيقة في منتصف المسافة بين موصلين اسطوانيين متشابهين في الهواء يحملان شحنتين $\pm Q$ ، وكانت هذه الصفيحة متعامدة مع الخط الذي يربط بين مركزيهما وكما مبين في شكل 3.5 وبما أنها تمثل موضعاً ذا جهدٍ متساوٍ قبل وضعها هناك ، عندئذ سوف لايضطرب المجال الـكهربائـي بوجودها . مـــن المعادلة [3.4] ف . ج . V_{10} بين الموصـــل 1 والصفيحة الموصلة 0 سيكـــون

$$V_{10} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left(Q_1 \log_e \frac{y_1}{x_1} + Q_2 \log_e \frac{y_2}{x_2}\right).$$

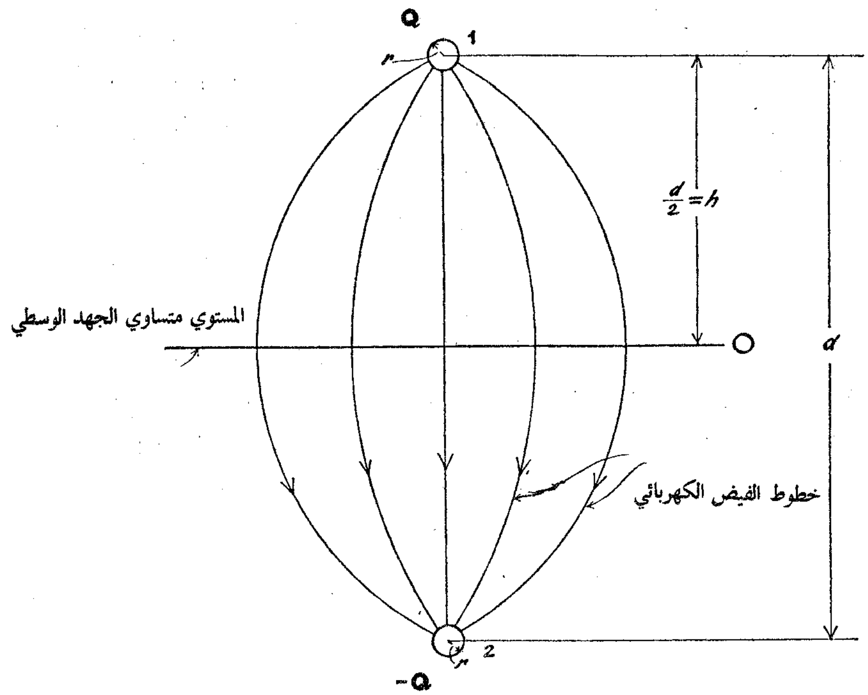
y_1 و y_2 هما المسافتان من أي نقطة على المستوى الموصل الى محاور الموصلين الحاملين للشحنتين Q_1 و Q_2. وهاتان تكونان متساويتين لـكل النقاط في المستوي .

$$Q_1 = +Q \quad \text{and} \quad Q_2 = -Q$$

x_1 هي المسافة من محور الموصل 1 الى شحنته والتـي كانـت قد بينت على أنهـــا مساوية الى نصف قطره (انظر المعادلة [3.7]) و x_2 هي المسافة من محور الموصل 1 الى محور الموصل 2 ، أي أن $x_2 = d$.

لذلك

$$V_{10} = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{d}{r} \qquad [3.12]$$



شكل 3.5. المستوي المتساوي الجهد المركزي بين موصلي خط ذي طور واحد . أومستوى الأرض مع صورة الشحنة لموصل خط واحد

السعة من موصل خط معزول هوائيا الى مستوى موصل تام يقع أسفل منه بمسافة h متر تكون

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e \frac{2h}{r}} \text{ F/m} \qquad [3.13]$$

كان من الممكن استنتاج هذا مباشرة من المعادلة [3.8] . بما أن السعة بين الموصلين في شكل 3.5 هي لسعتين متساويتين على التوالي . أحداهما تمثل السعة السعة لخط 1 الى الصفيحة الموصلة المركزية والأخرى هي لخط 2 الى الصفيحة نفسها حيث ان كل سعة لها القيمة

$$\frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e d/r}\ \text{F/m.}$$

من الضروري الملاحظة أن هذه القيمة مشابهة بالضبط للسعة الى محايد لخط ثلاثي الطور التي ستعطي في المعادلة .[3.20] . اذا كان المطلوب هو تاثير الارض على المجال الكهربائي لخطوط النقل فهذا يمكن تمثيله بموصل خط خيالي (صورة) يحمل شحنة مساوية ومعاكسة لشحنة كل موصل وموضوعة تحت سطح الأرض على بعد مساوٍ لبعد الموصل الحقيقي فوق سطح الأرض .

$p_{11}\mathbf{Q}_1$ كانت قد عرفت بأنها التغير في جهد الموصل 1 بسبب أكتسابه لشحنة $\mathbf{Q}_1$/ مترطول . من الممكن ان نرى الأن أنه اذا كان الموصل على ارتفاع h_1 متر فوق الارض فتغير الجهد هذا سيكون بسبب الشحنة $\mathbf{Q}_1$ على الموصل و شحنة الصورة $-\mathbf{Q}_1$ الواقعة شاقولياً تحت الموصل وعلى مسافة h_1 متر تحت سطح الأرض أي أنها $2h_1$ أسفل الموصل 1 . لذلك من المعادلة [3.13]

$$p_{11}\mathbf{Q}_1 = \frac{\mathbf{Q}_1}{\dfrac{2\pi\epsilon_o}{\log_e 2h_1/r}}$$

و

$$p_{11} = \frac{\log_e (2h_1/r)}{2\pi\epsilon_o} \qquad [3.14]$$

وبالتشابه $p_{21}\mathbf{Q}_1$ تمثل جهد الموصل 2 بسبب الشحنة $\mathbf{Q}_1$ على الموصل 1 / متر طول وعلى مسافة d_{12} وشحنة الصورة $-\mathbf{Q}_1$ على مسافة $d_{1'2}$. من المعادلة [3.3]

$$p_{21}\mathbf{Q}_1 = -\frac{\mathbf{Q}_1}{2\pi\epsilon_o}(\log_e d_{12} - \log_e d_{1'2}) = \frac{\mathbf{Q}_1}{2\pi\epsilon_o}\log_e \frac{d_{1'2}}{d_{12}}$$

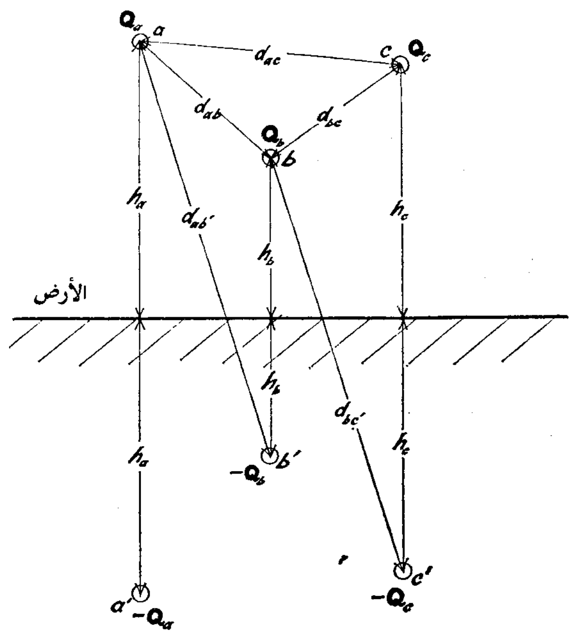
وبناءً عليه

$$p_{21} = \frac{\log_e (d_{1'2}/d_{12})}{2\pi\epsilon_o}. \qquad [3.15]$$

3.5 خط ثلاثي الطور ذو دائرة مفردة عام

General Single-circuit 3-phase Line

شكل 3.6 يبين خطا ثلاثي الطور ذا دائرة مفردة بدون موصل أرضي . كل من موصلات الخطوط a و b و c له موصل صورة يحمل شحنة مساوية ومعاكسة . المسافة بين موصل الطور وصورته هي ضعف ارتفاع الموصل فوق الارض ، مثلا $d_{aa'} = 2h_a$ .. الخ. كل موصلات الاطوار لها نصف القطر r نفسه . بالتماثل يمكننا ان نرى ان $d_{ab'} = d_{ba'}$ .. الخ .



شكل 3.6. خط ثلاثي الطور ذو دائرة مفردة مع شحنات صورة

اذا اعتبرنا جهد الارض صفرا فجهد الموصل ، ولنأخذ موصل طور a مثلا ، يكون بسبب

(1) الشحنتين Q_a و $-Q_a$ على a و a'

(2) الشحنتين Q_b و $-Q_b$ على b و b'

(3) الشحنتين Q_c و $-Q_c$ على c و c'

مساهمة الموصل 1 يمكن ان نراها من المعادلة [3.14] وتكون

$$\frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{2h_a}{r}.$$

ومساهمة الموصل (2) هي

$$\frac{\mathbf{Q}_b}{2\pi\epsilon_o}\log_e\frac{d_{ab'}}{d_{ab}}$$

(انظر المعادلة ([3.15]) ومساهمة الموصل (3) هي

$$\frac{\mathbf{Q}_c}{2\pi\epsilon_o}\log_e\frac{d_{ac'}}{d_{ac}}.$$

وهكذا فجهد موصل الطور a نسبة الى الارض يكون

$$\mathbf{V}_a=\frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a\log_e\frac{2h_a}{r}+\mathbf{Q}_b\log_e\frac{d_{ab'}}{d_{ab}}+\mathbf{Q}_c\log_e\frac{d_{ac'}}{d_{ac}}\right]$$

وبالتشابة

$$\mathbf{V}_b=\frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a\log_e\frac{d_{ab'}}{d_{ab}}+\mathbf{Q}_b\log_e\frac{2h_b}{r}+\mathbf{Q}_c\log_e\frac{d_{bc'}}{d_{bc}}\right] \qquad [3.16]$$

و

$$\mathbf{V}_c=\frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a\log_e\frac{d_{ac'}}{d_{ac}}+\mathbf{Q}_b\log_e\frac{d_{bc'}}{d_{bc}}+\mathbf{Q}_c\log_e\frac{2h_c}{r}\right]$$

باعادة كتابة هذه المعادلة بهيئة مصفوفة . فالتماثل سيمكن من تضمين تأثير سلك أرضي ذي نصف قطر r_e وارتفاع h_e فوق الأرض بوساطة التحسس وكما يلي

$$\begin{bmatrix}\mathbf{V}_a\\ \mathbf{V}_b\\ \mathbf{V}_c\\ \mathbf{V}_e=0\end{bmatrix}=\frac{1}{2\pi\epsilon_o}\log_e\begin{bmatrix}\frac{2h_a}{r} & \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} & \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} & \frac{d_{ae'}}{d_{ae}}\\ \frac{d_{ab'}}{d_{ab}} & \frac{2h_b}{r} & \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} & \frac{d_{be'}}{d_{be}}\\ \frac{d_{ac'}}{d_{ac}} & \frac{d_{bc'}}{d_{bc}} & \frac{2h_c}{r} & \frac{d_{ce'}}{d_{ce}}\\ \frac{d_{ae'}}{d_{ae}} & \frac{d_{be'}}{d_{bc}} & \frac{d_{ce'}}{d_{ce}} & \frac{2h_e}{r_e}\end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix}\mathbf{Q}_a\\ \mathbf{Q}_b\\ \mathbf{Q}_c\\ \mathbf{Q}_e\end{bmatrix} \qquad [3.17]$$

وهذا يعني

$$[\mathbf{V}]=[p]\,.\,[\mathbf{Q}]$$

و

$$[\mathbf{Q}]=[p]^{-1}[\mathbf{V}]=[c]\,.\,[\mathbf{V}].$$

مقلوب المصفوفة [3.17] يعطينا معادلات مشابهة الى [3.11] مع قيم سعة بين موصلات الأطوار وبين الأطوار والأرض . كل من هاتين المجموعتين ستكون بصورة عامة غير متوازنة بسبب عدم تساوي التباعد بين الموصلات .

السعات بين أزواج من الموصلات يمكن تمثيلها بتحويلة مثلثي – نجمي (delta-star) كثلاث سعات الى محايد ، وعندما يكون المحايد مؤرضاً أو يكون عند الجهد الأرضي فهذه السعات يمكن ان تضاف الى تلك الموجودة بين كل موصل والأرض . منظومة السعات التي أوجدت بأخذ مقلوب المصفوفة ذات معاملات p في [3.17] يمكن لذلك أن تقلل الى ثلاث سعات الى محايد ، واحدة من كل موصل خط .

من هذه النقطة فصاعداً سنعتبر هذه السعات الى المحايد فقط وستؤخذ على أنها متوازنة ، أي أنها متساوية لكل الأطوار الثلاثة . هذا سيكون قريباً من الحقيقة اذا كانت الخطوط قصيرة جداً ولاتحتاج لتبديل موضع الموصلات وسيكون حقيقياً اذا كانت الموصلات مبدلة الموضع .

3.6 السعة الى محايد للتتابع الموجب أو السالب لخط ثلاثي الطور ذي دائرة مفردة مبدلة الموضع

Positive- or Negative-sequence Capacitance to Neutral of a Transposed Single-circuit 3-phase Line

عند حساب سعة التتابع الموجب (أو السالب) فالخط بصورة اعتيادية يفترض أن يكون مبدل الموضع وكذلك يمكن أهمال تأثير أي سلك أرضي هوائي سائر – فوقيا (فمثلاً وجود السلك الأرضي لخط ذي دائرة مفردة 132 كيلو فولت نموذجي يقلل السعة الى محايد بحوالي 1%) .

اذا كان الخط مبدل الموضع كما مبين في شكل 3.7 ، فحينئذ للثلث الأول من الطول ، ستشغل موصلات الأطوار a ، b ، c المواضع 1 ، 2 و 3 كما مبين ، وهكذا بالنسبة للموضعين الآخرين من الدورة .

يجب أن يلاحظ أنه قد افترض هنا ، تبسيطاً للحل ، أن الشحنة / وحدة طول على موصل a تكون Q_a لكل موضع من مواضع التبديل الثلاثة . اذا أردنا أن نكون

دقيقين فهذا ليس حقيقياً لأنه اذا كان هبوط الفولتية بسبب ممانعة التوالي للخط صغيراً الى حد الاهمال ففولتية الطور الى المحايد V_a ستكون نفسها لكل المواضع الثلاثة . وبما أن السعة الى المحايد لكل موصل طور تختلف لهذه المواضع فعندئذ الشحنة / وحدة طول يجب أن تختلف كذلك . مع ذلك سيكون أسهل بكثير لو أخذنا Q_a على أنها ثابتة و V_a على أنها متغيرة ومن ثم نجد معدل قيمة V_a للمواضع الثلاثة . الفرق بين السعات المحسوبة هنا وتلك المحسوبة بأعتبار V_a ثابتة يكون صغيراً الى حد الأهمال .

للموضع الأول ، المعادلة [3.16] تعطينا جهد الموصل a نسبة الى المحايد وكما يلي :

$$V'_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a \log_e \frac{2h_1}{r} + Q_b \log_e \frac{d_{12'}}{d_{12}} + Q_c \log_e \frac{d_{13'}}{d_{13}}\right]$$

وللموضعين الاخرين

$$V''_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a \log_e \frac{2h_2}{r} + Q_b \log_e \frac{d_{23'}}{d_{23}} + Q_c \log_e \frac{d_{12'}}{d_{12}}\right] \qquad [3.18]$$

(مرة أخرى نستعمل حقيقة كون $d_{21'} = d_{12}$ ... الخ) و

$$V'''_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[Q_a \log_e \frac{2h_3}{r} + Q_b \log_e \frac{d_{13'}}{d_{13}} + Q_c \log_e \frac{d_{23'}}{d_{23}}\right]$$

وقيمة المعدل تكون

$$V_a = \tfrac{1}{3}(V'_a + V''_a + V'''_a).$$

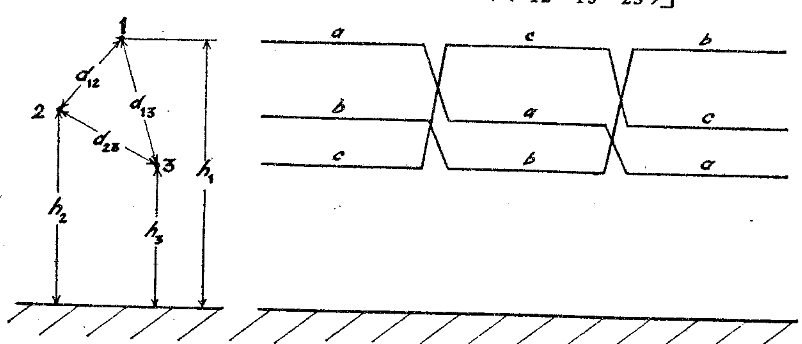
بالنسبة لفولتيات التتابع الموجب أو السالب المسلطة على الخط تكون

$$Q_a + Q_b + Q_c = 0$$

لذلك تكون

$$V_a = \frac{1}{3}\frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e \frac{8h_1h_2h_3}{r^3} - \log_e \frac{d_{12'}d_{13'}d_{23'}}{d_{12}d_{13}d_{23}}\right]$$

$$= \frac{Q_a}{2\pi\epsilon_o}\log_e\left[\frac{\sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})}}{r} \cdot \frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(d_{12'}d_{13'}d_{23'})}}\right]$$



شكل 3.7. خط ثلاثي الطور مبدل الموضع

السعة الى محايد لكل موصل طورٍ والتي يفترض أن تكون متوازنة بالنسبة لخط قصير ، أو يمكن أن تجعل متساوية اذا كان الخط مبدل الموضع ، ستكون لذلك معطاة بالمعادلة

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e\left[\frac{D_m}{r}\cdot\frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(d_{12'}d_{13'}d_{23'})}}\right]}\ \text{F/m} \qquad [3.19]$$

حيث أن D_m هو متوسط المباعدة الهندسي بين الموصلات ومعطى بالمعادلة التالية

$$D_m = \sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})}.$$

كلما كان ارتفاع الخط عن الأرض أعلى مقارنة مع المباعدة بين الموصلات ،

كلما تقترب القيمة $\frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{\sqrt[3]{(d_{12'}d_{13'}d_{23'})}}$

من الواحد .

اذا أهملنا تأثير الارض عندئذ تكون السعة الى المحايد

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e(D_m/r)}\ \text{F/m}. \qquad [3.20]$$

بما أن $\log_{10} D_m/r$ يكون عادة بين 2 و 3 . فكيلو متر واحد من خط معلق له سعة الى المحايد بحدود $0{\cdot}01\ \mu F$.

بالنسبة لخط نموذجي 132-kV ثلاثي الطور ذي دائرة مفردة . فالسعة المعطاة بالمعادلة [3.19] تزيد عن تلك المعطاة بالمعادلة [3.20] بحوالي 1% فقط . لذلك بالنسبة لفولتيات التتابع الموجب والسالب يكفي بصورة عامة استعمال [3.20] . بناء على ذلك فالسلك الأرضي أو الأرضي نفسه غالباً مايهمل .

من المعادلتين [3.20] و [3.8] . يمكن أن نرى أنه اذا جعلنا موصلات خط ثلاثي الطور على رؤوس مثلث متساوي الأضلاع طول ضلعه d متر . اي أن $D_m = d$. واذا شغلنا خطاً أحادي الطور مع محايد منتصف الطريق في الجهد بين الموصلين . فعندئذ في كلتا الحالتين ستكون السعة الى محايد معطاة بالمعادلة

$$\frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e d/r}\ \text{F/m}.$$

سعة التتابع الموجبة المعطاة في [3.20] لخط ثلاثي الطور ذي دائرة مفردة بدون تأثير الأرض أو السلك الأرضي ، يمكن أن تحسب بطريقة مباشرة أكثر مما ذكر أعلاه بدلاً من استعمال [3.5] و[3.6] ، والتي تعطي الجهد لخط نسبة الى الأرض بسبب زوج من الشحنات صورهـــا بسبب الأرض ، شحنات متساوية ومعاكسة الى تلك التي على موصلات الخط الثلاثة يمكن أن توضع على موصل وهمي يكون بعيداً جداً عـــن الموصلات الحقيقية والتي يمكن أن يقال أنها تبعد بمسافة S عن كل منها .
لذلك فالمعادلة 3.18 يمكن ان تبدل بالمعادلة

$$\mathbf{V}'_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a \log_e \frac{S}{r} + \mathbf{Q}_b \log_e \frac{S}{d_{12}} + \mathbf{Q}_c \log_e \frac{S}{d_{13}}\right]$$

$$\mathbf{V}''_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a \log_e \frac{S}{r} + \mathbf{Q}_b \log_e \frac{S}{d_{23}} + \mathbf{Q}_c \log_e \frac{S}{d_{12}}\right]$$

$$\mathbf{V}'''_a = \frac{1}{2\pi\epsilon_o}\left[\mathbf{Q}_a \log_e \frac{S}{r} + \mathbf{Q}_b \log_e \frac{S}{d_{13}} + \mathbf{Q}_c \log_e \frac{S}{d_{23}}\right]$$

اذا فصلنا الحدود ، فالحد الحاوي على S سيختفي لأن

$$\mathbf{Q}_a + \mathbf{Q}_b + \mathbf{Q}_c = 0$$

و

$$\mathbf{V}_a = \tfrac{1}{3}(\mathbf{V}'_a + \mathbf{V}''_a + \mathbf{V}'''_a) = \frac{\mathbf{Q}_a}{2\pi\epsilon_o} \log_e \frac{\sqrt[3]{(d_{12}d_{13}d_{23})}}{r}$$

والتي تعطي نتيجة المعادلة [3.20] .

اذا كان الخط يعمل بفولتية خط $\mathbf{V}_L$ وهبوط الفولتية على ممانعة التوالي له كان صغيراً جداً مقارنة بالفولتية $\mathbf{V}_L$ فتلك الأخيرة يمكن أن تعتبر على أنها الفولتية بين زوج من الخطوط عند كل نقطة على طول المسار . فعندئذ يكون تيار الشحن الجاري في كل من موصلات الخط الثلاثة عند نهاية الأرسال من الخط هو

$$\mathbf{I}_c = \mathrm{j}\,\omega C l \frac{\mathbf{V}_L}{\sqrt{3}} \text{ amperes,}$$

حيث أن C معطاة بالمعادلة [3.20] و l هي طول مسار الخط بالأمتار.

3.7 السعة الى محايد للتتابع الصفري لخط ثلاثي الطور ذي دائرة مفردة مبدلة الموضع

Zero-sequence Capacitance to Neutral of a Transposed Single-circuit 3-phase Line

3.7.1 بـدون سلـك ارضي : WITHOUT EARTH WIRE

اذا كان للخط المبين في شكل 3.7 فولتية تتابع صفري فقط مسلطة عليه فعندئذ بحيث ان $V_{ao} = V_{bo} = V_{co}$

$$Q_a = Q_b = Q_c = Q$$

تبعاً لذلك

$$V_{ao} = \frac{1}{3}\frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e\frac{2h_1}{r} + \log_e\frac{d_{12'}}{d_{12}} + \log_e\frac{d_{13'}}{d_{13}} + \log_e\frac{2h_2}{r} + \log_e\frac{d_{23'}}{d_{23}} + \log_e\frac{d_{12'}}{d_{12}} + \log_e\frac{2h_3}{r} + \log_e\frac{d_{13'}}{d_{13}} + \log_e\frac{d_{23'}}{d_{23}}\right]$$

$$= \frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\log_e\left(\frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{r}\cdot\sqrt[3]{\left[\left(\frac{d_{12'}d_{13'}d_{23'}}{d_{12}d_{13}d_{23}}\right)^2\right]}\right)$$

والسعة الىمحايدللتتابع الصفري تكون

$$C_o = 2\pi\epsilon_o\frac{1}{\log_e\left(\frac{2\sqrt[3]{(h_1h_2h_3)}}{r}\cdot\sqrt[3]{\left[\left(\frac{d_{12'}d_{13'}d_{23'}}{d_{12}d_{13}d_{23}}\right)^2\right]}\right)}\ \text{F/m.} \qquad [3.21]$$

حيث ان h_1، h_2 و h_3 $\gg$ d_{12} و d_{13} و d_{23}

$$\sqrt[3]{(8h_1h_2h_3(d_{12'}d_{13'}d_{23'})^2)} \simeq 8h_1h_2h_3$$

وبذلك

$$C_o \simeq 2\pi\epsilon_o\frac{1}{\log_e(8h_1h_2h_3/rD_m^2)}\ \text{F/m.} \qquad [3.22]$$

3.7.2 مـع سلـك ارضـي : — WITH EARTH WIRE

في حالة سعة التتابع الصفري ، فالسلك الأرضي المعلق فوق موصل الطور ليقلل من ضربة الصاعقة المباشرة ،قد يزيد السعة بكمية تقدر بحدود 10% وبذلك فأن وجوده لايمكن أن يهمل كما يمكن أن يعمل بالنسبة للتتابع الموجب . السلك الأرضي له نصف قطر r_e وهو على ارتفاع h_e فوق الأرض . d_{1e} هي المسافة بين الموصل في الموضع 1. (أنظر شكل 3.7) والسلك الأرضي و $d_{1e'}$ هي المسافة من 1 الى صورة السلك الأرضي ، والـخ .

لكي نسمح بوجوده فالشحنة Q_e/ وحدة طول من السلك الأرضي يجب أن توجد بدلالة الشحنة Q كولومب / متر الموجودة على كل من موصلات الطور، وهذا يمكن اجراؤه باستعمال المعادلة [3.17] . المعادلات التي كتبت الآن تنتسب الى الموضع الأول في دورة تبادل الموضع ، أي ان $d_{ab'} = d_{12'}$ و $d_{ab} = d_{12}$ و $h_a = h_1$ ... الـخ (أنظر شكل 3.7) المعادلة [3.17] مع $Q_a = Q_b = Q_c = Q$ تعطينا للجزء الأول من الدورة مايلي

$$V'_a = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e\frac{2h_1}{r}+\log_e\frac{d_{12'}}{d_{12}}+\log_e\frac{d_{13'}}{d_{13}}\right]+\frac{Q_e}{2\pi\epsilon_o}\log_e\frac{d_{1e'}}{d_{1e}} \qquad [3.23]$$

$$V'_e = 0 = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e\frac{d_{1e'}}{d_{1e}}+\log_e\frac{d_{2e'}}{d_{2e}}+\log_e\frac{d_{3e'}}{d_{3e}}\right]+\frac{Q_e}{2\pi\epsilon_o}\log_e\frac{2h_e}{r_e} \qquad [3.24]$$

ومن [3.24]

$$Q_e = \frac{-Q\,.\,\log_e(d_{1e'}d_{2e'}d_{3e'}/d_{1e}d_{2e}d_{3e})}{\log_e(2h_e/r_e)} \qquad [3.25]$$

المعادلة [3.25] تؤكد الحقيقة ، التي يجب أن تكون واضحة ذاتياً ، وهي ان العلاقة نفسها بين Q_e و Q يجب أن تكون موجودة في كل المواضع الثلاثة في دورة تبادل الموضع .

بتعويض قيمة Q_e من [3.25] في [3.23] نحصل على

$$V'_a = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e\frac{2h_1d_{12'}d_{13'}}{rd_{12}d_{13}}-\frac{\log_e\frac{d_{1e'}}{d_{1e}}\,.\,\log_e\frac{d_{1e'}d_{2e'}d_{3e'}}{d_{1e}d_{2e}d_{3e}}}{\log_e\frac{2h_e}{r_e}}\right]$$

وبالتشابه

$$\mathbf{V}_a'' = \frac{\mathbf{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e \frac{2h_2 d_{23'} d_{12'}}{r d_{23} d_{12}} - \frac{\log_e \frac{d_{2e'}}{d_{2e}} \cdot \log_e \frac{d_{1e'} d_{2e'} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}}{\log_e \frac{2h_e}{r_e}}\right]$$

و

$$\mathbf{V}_a''' = \frac{\mathbf{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e \frac{2h_3 d_{13'} d_{23'}}{r d_{13} d_{23}} - \frac{\log_e \frac{d_{3e'}}{d_{3e}} \cdot \log_e \frac{d_{1e'} d_{2e'} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}}{\log_e \frac{2h_e}{r_e}}\right]$$

اذا عملنا التقريبات نفسها كالسابق بالنسبة للحدود الأولى في $\mathbf{V}_a'$ و $\mathbf{V}_a''$ و $\mathbf{V}_a'''$ ، وهذا يعني أن

$$\sqrt[3]{(8h_1h_2h_3(d_{12'}d_{13'}d_{23'})^2)} \simeq 8h_1h_2h_3$$

$$\mathbf{V}_a = \tfrac{1}{3}(\mathbf{V}_a' + \mathbf{V}_a'' + \mathbf{V}_a''') \simeq \frac{\mathbf{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left[\log_e \frac{8h_1h_2h_3}{rD_m^2} - \frac{1}{3\log_e(2h_e/r_e)}\left(\log_e \frac{d_{1e'} d_{2e'} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}\right)^2\right]$$

تكون السعة

$$C_o \simeq 2\pi\epsilon_o \frac{1}{\log_e \frac{8h_1h_2h_3}{rD_m^2} - \frac{1}{3\log_e \frac{2h_e}{r_e}}\left(\log_e \frac{d_{1e'} d_{2e'} d_{3e'}}{d_{1e} d_{2e} d_{3e}}\right)^2} \text{ F/m.} \qquad [3.26]$$

3.8 الهالـة Corona

اذا رفعنا الفولتية المتناوبة على موصل خط منظومة ما بالتدريج ، فستصل الى قيمة تعرف بأنها الفولتية الحرجة المرئية V_v . وعندها يظهر توهج بنفسجي خافت يعرف بالهالة . ويكون مصحوب بأزيز خفيف ورائحة غاز الأوزون (ozone) . عند الفولتية V_o التي تقل قليلاً عن الفولتيـة V_v خسارة اضافيـة في القدرة تبـدأ فـي الحدوث في المنظومة . هذه الخسارة P معطاة بصورة تقريبية بالمعادلة

$$P = K(V - V_o)^2 \qquad [3.27]$$

حيث أن K وفولتية التمزيق الحرجة V_o . يكونان ثابتين بالنسبة لترتيب موصل معين وتردد محدد وموجة تجهيز محددة . هذه الخسارة من الممكن أن تزداد بصورة ملموسة

بوجود الضباب والمطر ، V_t ، فولتية التشغيل ، و V_o و V_v كلها فولتيات ج. م. ت وبالنسبة لخط ثلاثي الطور فكلها تكون خطاً الى محايد ، أي فولتية الطور. لايكفي دائماً تحديد المجال الكهربائي بمعيار حصر خسارة القدرة الى نسبة معينة ، لأن التداخل الراديوي يمكن أن يصل الى حد غير مسموح به في حين أن خسارة القدرة الهالية قليلة نسبياً .

الهالة هي تفريغ جزئي ، أي اخفاق غير تام للهواء . وذا زادت الفولتية أكثر من V_v فعندئذ يحدث انهيار شرري لكل المجال الهوائي . الهالة تحدث عندما يكون المجال الكهربائي الموضعي قرب سطح الموصل عالياً لدرجة كافية لتعطي طاقة كافية الى الالكترونات الحرة ، الناشئة مثلاً من اشعاعات كونية ، لكي تؤين جزيئات الغاز عند التصادم معها . وبذلك ستظهر ألكترونات وأيونات موجبة أكثر والتي بدورها ستكون معجلة بالمجال الكهربائي مسببة مصادمات أيونية اضافية .

اذا استعملنا المجال الكهربائي عند سطح الموصل E_r بدلاً من فرق الجهد V فعندئذ تكون قيم E_r والتي تعطي النقاط الحرجة الممزقة (E_o) والمرئية (E_v) ، غير معتمدة على المباعدة . بالنسبة للموصلات الناعمة ذات القطر الكبير جدا في الهواء وعند درجة حرارة اعتيادية وضغط اعتيادي ، يبدأ ضياع القدرة الهالي عند جهد التمزيق الحرج وعندما تكون

$$E_r = E_o \simeq 30 \text{ kV الذروة/cm.}$$

بالنسبة لفولتية مسلطة ذات -50 هيرتز ، ولموصل ذي نصف قطر r سم والذي هو ضمن قيم المدى الأعتيادي ، فان الهالة تصبح مرئية عندما يصل تدرج الذروة الى

$$E_v = E_o(1+0{\cdot}3r^{-\frac{1}{2}}). \qquad [3.28]$$

هذه الفولتية الحرجة المرئية يمكن لذلك ان توجد بتعويض القيمة المعينة E_v المعطاة بالمعادلة [3.28] بدلاً من القيمة العامة E_r .
ان جدل موصلات الخط يسبب ظهور الهالة عند مجال كهربائي وفولتية أقل من تلك المعطاة بالمعادلة [3.28] : التقليل النموذجي في الفولتية يتراوح بين 25 الى 30%. هذا يمكن أخذه بنظر الأعتبار باستعمال معامل الخشونة M وكما مبين لاحقاً (المعادلة

[3.32]) . تزداد E_o بالتناسب الى كثافة الهواء δ . اذا أخذت δ على أنها 1·0 عند 20°C و 76 سم زئبق فعندئذ بالنسبة لضغط جوي b سم و$\theta°$ درجة مئوية

$$\delta = \frac{3{\cdot}86b}{(273+\theta)}. \qquad [3.29]$$

ويجب أن يلاحظ الطالب أن [3.29] تتبع من المعادلة المميزة للغازات التامة . هذه المعادلـة غالباً مايؤشـر عليها بعلامات مختلفـة عن تلـك التي في [3.29] وأعنـي $pV = mRT$ حيث أن p هو ضغط الغاز وV الحجم وm هي كتلة الغاز وT هـي الحرارة المطلقة وR هو ثابت الغاز العمومي . ضع $\delta = m/V$ ، غير العلامات واحذف R بالتبصر في الظروف الجديدة بدلالة الظروف القياسية نحصل على

$$\frac{b}{\delta(273+\theta)} = \frac{76}{1\times 293}$$

الثابت المعطى كرقم 0·3 في [3.28] هو في الحقيقة متغير ، اذا تبدلت الكثافة ، ويتناسب مع $\delta^{-\frac{1}{2}}$ ، ومن الممكن كتابته على أنه $0{\cdot}30\delta^{-\frac{1}{2}}$. مرة أخرى لموصل نصف قطره r مقاساً بالسنتمترات .

من [3.1] يكون الجهد عند السطح لأحد الموصلين لخط أحادي الطور كل منهما ذو نصف قطر r هو

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o r}$$

اذا كانت المباعدة بين الموصلات d كبيرة بدرجة كافية بحيث أن الشحنة على الموصل الآخر لها تأثير مهمل . وهذا حقيقيٌ للقيم الأعتيادية لـ d/r . من [3.7] اذا كانت V هي ف . ج. بين الموصلين ، فعندئذ

$$V = \frac{Q}{\pi\epsilon_o}\log_e\frac{d}{r}$$

وبذلك

$$V = 2r\,E_r \log_e (d/r). \qquad [3.30]$$

اذا أخذنا بنظر الأعتبار تأثير الضغط ودرجة الحرارة وجدل الموصل . واذا استعملنا القيمة الأسمية لـ E_o على أنها تساوي 30 كيلو فولت (ذروة) / سم عند N.T.P. (ضغط جوي اعتيادي ودرجة حرارة اعتيادية) فالمعادلة [3.28] تصبح

$$E_v = \frac{30}{\sqrt{2}}\delta M\left(1+\frac{0{\cdot}30}{\sqrt{(\delta r)}}\right) \text{kV(r.m.s.)/cm.} \qquad [3.31]$$

في المعادلة [3.30] عندما يصل الجهد عند الموصل الجهد الحرج للهالة المرئية فان ف . ج. بين الموصلين يصل القيمة الحرجة V_v.

$$V_v = \frac{60}{\sqrt{2}} r\delta M\left(1+\frac{0 \cdot 30}{\sqrt{(\delta r)}}\right)\log_e \frac{d}{r} \quad \text{kV (r.m.s.).} \qquad [3.32]$$

في حالة خط ثلاثي الطور معج. م. ت فولتية الطور (خط الى محايد) V ، فعندئذ من المعادلة [3.20] .

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o}\log_e \frac{D_m}{r}$$

$$= rE_r \log_e \frac{D_m}{r}$$

وبذلك فالقيمة الحرجة V_v لفولتية الطور والتي عندها تنشأ الهالة تعطى بالمعادلة

$$V_v = \frac{30}{\sqrt{2}} r\delta M\left(1+\frac{0 \cdot 30}{\sqrt{(\delta r)}}\right)\log_e \frac{D_m}{r} \quad \text{kV (r.m.s.).} \qquad [3.33]$$

يمكننا أن نرى من المثال التالي أنه للقيم الأعتيادية لـ D_m/r التي نواجهها في الخطوط الثلاثية الطور . يمكن أن يعطى الجهد الأعظم بصورة تقريبية جداً بالمعادلة

$$E_r = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o r}$$

كما انها تنطبق على الخط الاحادي الطور المعطى اعلاه .

مثال 3.1

اذا كانت بداية الهالة في الهواء تحدث عندما يصل الجهد الكهربائي عند اي نقطة 30 كيلوفولت / سم . فأحسب الفولتية القصوى التي عندها يمكن ان يشتغل خط علوي معلق ثلاثي الطور بدون الهالة اذا كانت له موصلات ذات قطر 1.5 سم . مع مباعدة متساوية بين الاطوار مقدارها 2·5 متر .

الحـــل

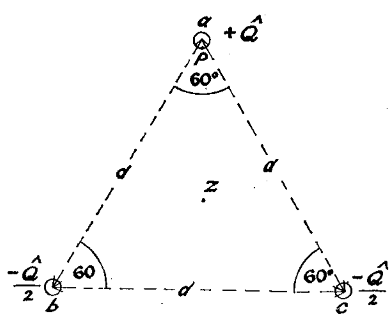
من المعادلة [3.1] يمكننا ان نرى أن الجهد الاقصى سيحدث عند سطح الموصل في اللحظة التي تكون فيها الشحنة القصوى عليه . اى عندما تكون عند ذروة فولتية الطور V_m نسبة الى الارض . حيث ان $V_m = \sqrt{2}\,V$ و V هي ج . م . ت . فولتية الطـــور. $V = (1/\sqrt{3})V_L$ حيث ان V_L هي ج . م . ت فولتية الخط .

اذا كانت الشحنة على الموصل a هي $\hat{Q}$ كولومب / متر في اللحظة التي يكون فيها ف.ج بين a والمحايد هو، V_m ففي تلك اللحظة، بما ان فولتيات الموصلات b و c الى المحايد كلاهما تكون: $-V_m/2$، ستكون كل من شحنتيهما / وحدة طول مساوية الى $\mp\hat{Q}/2$ (انظر شكل 3.8)

الشحنة $\hat{Q}$ على الموصل a تعطي جهداً كهربائيا عند p،النقطة التي على سطحها على خط يربط مركزها الى مركز المثلث المتساوي الاضلاع z،مقداره

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o r}\ \text{V/m} \quad \text{from } [3.1]$$

وهذا الجهد يكون على طول الخط zp .



شكل: 3.8

الجهود الكهربائية بسبب الشحنات $-\hat{Q}/2$ على b و ، تلغي بعضها بالاتجاه العمودي الى zp ، ولكن على طول zp ستعطى كلها سوية

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o d}\sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}\hat{Q}\frac{1}{2\pi\epsilon_o d}$$

الجهد الكلي عند p الموجه على طول zp . ، والذي هو القيمة القصوى ، يكون لذلك

$$\frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left(\frac{1}{r}+\frac{\sqrt{3}}{2d}\right). \qquad [3.34]$$

V_m و $\hat{Q}$ تنسب الى بعضها بوساطة السعة الى المحايد

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o}{\log_e (d/r)}$$ (المعادلة [3.20])

بما ان $D_m = d$ هنا . لذلك

$$\hat{Q} = \frac{2\pi\epsilon_o V_m}{\log_e (d/r)}. \qquad [3.35]$$

وبتعويض قيمة $\hat{Q}$ من (3.35) في (3.34) نحصل على

$$\text{الأجهاد الأعظم} = \frac{V_m}{\log_e (d/r)}\left(\frac{1}{r}+\frac{\sqrt{3}}{2d}\right)$$

$$3\times 10^6 = \frac{V_m}{\log_e (250/0{\cdot}75)}\left(\frac{100}{0{\cdot}75}+\frac{\sqrt{3}}{5}\right)$$

$$V_m \simeq 3\times 10^4 \times 0{\cdot}75 \log_e \frac{250}{0{\cdot}75} = 131\ 000 \text{ volts.}$$

فولتية الخط (ج . م . ت) العظمى التي يجب ان تستعمل تكون بناء على ذلك
$= 131\sqrt{3}/\sqrt{2} = 160{\cdot}5$ kV.

3.9 الموصلات الحزمية أو المتعددة Bundle or Multiple Conductors

هذه الفقرة تشير الى استعمال اكثر من موصل خط واحد / وسنتبصر هنا في خطوط ثلاثية الطور ذات دائرة مفردة .

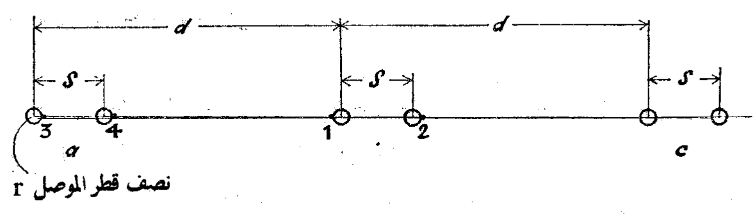
اذا بدلنا موصلا مصمتا بمجموعة مكونة من موصلات متعددة مؤلفة من موصلات عددها n كل منها ذو نصف قطر r مرتبة على محيط دائرة ومجموع مقاطع هذه الموصلات مساو الى ذاك الذي للموصل المفرد (اي ان الاخير له نصف قطر مقداره $r\sqrt{n}$) فعندئذ ستزداد الفولتية الحرجة المرئية لسببين :

(أ) بالنسبة لفولتية الخط نفسها ، فالمجال الكهربائي السطحي الاقصى يكون اقل للموصلات الحزمية من الموصل المفرد . الموصلات المتعددة تميل نحو اسطوانة نحيفة لها

قطر اكبر بكثير من ذاك الذي للموصل المفرد كلما ازدادت n ، والمعادلة [3.1] تبين ان هذا يقلل من المجال السطحي .

(ب) كما تبين المعادلة [3.28] ، فان الجهد السطحي يجب أن يصل الى قيمة أعظم لكي يصبح ممكناً رؤية الهالة فيما يخص الموصل الصغير عن القيمة اللازمة للموصل الكبير. لذلك يمكن رفع فولتية المنظومة عند استعمال الموصلات الحزمية .
ترتيب مقادير هده العوامل (أ) و (ب) سنتبصر به الآن بحسابات تقريبية وسنأخذ (أ) اولاً .
شكل 3.9 يبين خطاً ثلاثي الطور في الهواء مع موصلين / طور كل منهما ذو نصف قطر r متر، وكلها في مستوٍ واحد . موصلات كل طور يبتعد بعضها عن بعض بمسافة S متر، مع مسافة d متر بين الموصلات المتناظرة لطورين متجاورين .

سنفترض ان موصلات الطور الواحد جميعاً عليها الشحنة الكلية نفسها عند أية لحظة ، وهذه الشحنات موزعة بانتظام فوق السطح . هذه الفرضيات لاتبطل الأستنتاجات العامة للتجليلات المبسطة التالية (Parton and Wright, 1965) . التحليلات تطبق على التتابع الموجب أو السالب لفولتيات المنظومة لذلك فمجموع الشحنات يساوي صفراً عند كل لحظة مع توزيع يعتمد على السعات الى الأرض أو الى السلك (أو الأسلاك) الأرضي وبين الموصلات . سنفترض هنا ان توزيع الشحنة يعتمد على توازن السعات



شكل 3.9. خط دو دائرة – مفردة دات موصلين / طور تقع كلها في مستوٍ أفقي واحد

الى الأرض ، لذلك تكون الشحنات ذات اتساع متساو وبالطور نفسه مع الفولتية الى الأرض الخاصة بها . بينما يكون هذا التقريب متضارباً مع اهمال الأرض أو السلك (او الأسلاك) الأرضي في التحليلات التالية ، فأنه لايؤثر كثيراً على المقارنة بين موصلين لكل طور وموصل واحد لكل طور، وكذلك تبسط التحليلات بما يكفي لها لكي تشمل هنا ضمن مجال معتبر. الجهد الأقصى سيحدث عند سطح موصل ما على الخط الرابط بين مراكز الموصلات ، في اللحظة التي تصل عندها فولتية ذلك الطور القيمة القصوى نسبة الى المحايد . اذا قارنا التعابير الرياضية لمجالات السطح القصوى عند النقاط 1 ,2 ,3 و 4 فيمكننا ان نرى بالمعاينة أن $E_4 > E_1 (= E_2) > E_3$.

عندما تأخذ فولتية موصلي طور a قيمتها القصوى $\hat{V}_{an}$ نسبة الى المحايد ، ففرق الجهد v_{ab} بين الموصلين a و b يكون 0.866 مضروباً بقيمتها القصوى ، أي أن $v_{ab} = 0.866 \hat{V}_{ab}$. اذا كان لكل من موصلات الطور a شحنة $\hat{Q}$ عند هذه اللحظة فعندئذ تكون لكل من موصلات الطورين b و c شحنة مقدارها $-\hat{Q}/2$.

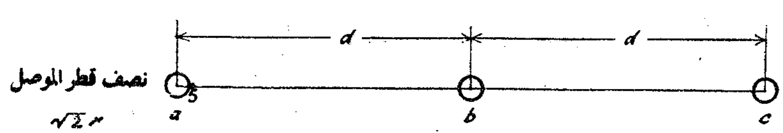
$$\therefore E_4 = \frac{\hat{Q}}{2\pi\epsilon_o}\left[\frac{1}{r} + \frac{1}{(r+S)} + \frac{1}{2(d-S-r)} + \frac{1}{2(d-r)} + \frac{1}{2(2d-S-r)} + \frac{1}{2(2d-r)}\right]. \quad [3.36]$$

ف . ج . بين موصلات الطورين a و b عند هذه اللحظة يكون

$$v_{ab} = 0.866\,\hat{V}_{ab} = \int_r^{(d-S-r)} E_x dx$$

حيث ان E_x يمكن أن نحصل عليها من المعادلة [3.36] بكتابة x بدلاً عن r

$$v_{ab} = \frac{\hat{Q}}{4\pi\epsilon_o}\left[3\log_e\left(\frac{d-S-r}{r}\right) + 3\log_e\left(\frac{d-r}{r+S}\right) - \log_e\left(\frac{d+r}{2d-S-r}\right) - \log_e\left(\frac{d+S+r}{2d-r}\right)\right] \quad [3.37]$$



شكل 3.10 خط ذو دائرة مفردة مع موصل واحد / طور في مستوي أفقي واحد

وبتعويض قيمة Q المعطاة بالمعادلة [3.37] في المعادلة [3.36] نحصل على

$$E_4 = \frac{\sqrt{3}\,\hat{V}_{ab}}{3\log_e\left(\frac{d-S-r}{r}\right)+3\log_e\left(\frac{d-r}{r+S}\right)-\log_e\left(\frac{d+r}{2d-S-r}\right)-\log_e\left(\frac{d+S+r}{2d-r}\right)}$$

$$\times\left[\frac{1}{r}+\frac{1}{(r+S)}+\frac{1}{2(d-S-r)}+\frac{1}{2(d-r)}+\frac{1}{2(2d-S-r)}+\frac{1}{2(2d-r)}\right] \quad [3.38]$$

اذا تبصرنا في المنظومة البديلة ذات الموصل الواحد / طور المبينة في شكل 3.10 وذات نصف قطر موصل $\sqrt{2r}$ فعندئذ ، باستعمال فرضيات مشابهة ، يحدث الجهد الأقصى عند النقطة 5 في اللحظة عندما تكون $v_{an} = \hat{V}_{an}$ و $v_{ab} = 0{\cdot}866\,\hat{V}_{ab}$.
اذا كانت شحنة الموصل a عند هذه اللحظة هي $\hat{Q}_1$ وكانت $-\hat{Q}_1/2$ على الموصلين b و c فعندئذ

$$E_5 = \frac{\hat{Q}_1}{2\pi\epsilon_o}\left[\frac{1}{\sqrt{2}\,r}+\frac{1}{2(d-\sqrt{2}\,r)}+\frac{1}{2(2d-\sqrt{2}\,r)}\right] \quad [3.39]$$

و

$$0{\cdot}866\,\hat{V}_{ab} = \int_{\sqrt{2}\,r}^{(d-\sqrt{2}\,r)} E_x\,dx$$

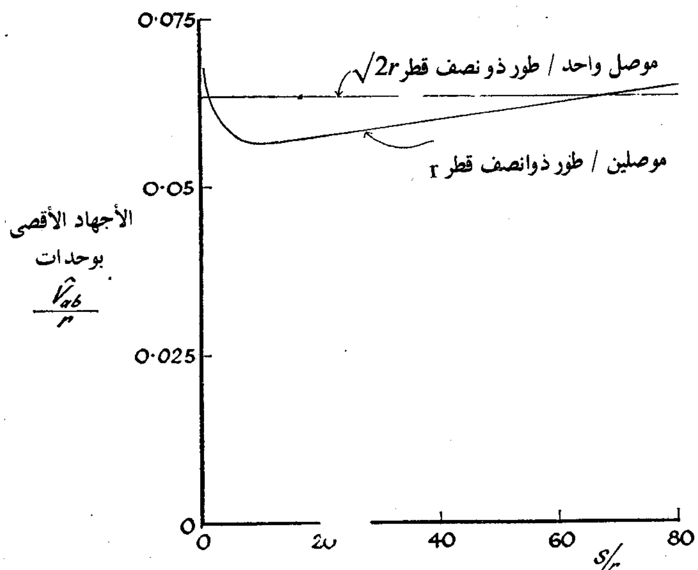
وبذلك

$$0{\cdot}866\,\hat{V}_{ab} = \frac{\hat{Q}_1}{4\pi\epsilon_o}\left[3\log_e\left(\frac{d-\sqrt{2}\,r}{\sqrt{2}\,r}\right)+\log_e\left(\frac{2d-\sqrt{2}\,r}{d+\sqrt{2}\,r}\right)\right] \quad [3.40]$$

وبالتعويض عن $\hat{Q}_1$ في [3.39] من [3.40] نحصل على

$$E_5 = \frac{\sqrt{3}\,\hat{V}_{ab}}{3\log_e\left(\frac{d-\sqrt{2}\,r}{\sqrt{2}\,r}\right)+\log_e\left(\frac{2d-\sqrt{2}\,r}{d+\sqrt{2}\,r}\right)}$$

$$\times\left[\frac{1}{\sqrt{2}\,r}+\frac{1}{2(d-\sqrt{2}\,r)}+\frac{1}{2(2d-\sqrt{2}\,r)}\right] \quad [3.41]$$



شكل .3.11 تغير الجهد الكهربائي الأقصى مع النسبة
S/r for d/r = 700.

من المعادلتين [3.38] و[3.41] يمكننا ان نقارن الجهد الأقصى لخط ثلاثي الطور ذي موصلين / طور مع ذاك الخط ذي الموصل الواحد / طور. هذا تم انجازه في الشكل 3.11 لـ $d/r = 700$ والذي هو يقارب النسبة المعمول بها في بعض خطوط الجهد الفائق (E.H.V.) ، وهي تبين ان هناك مدى من قيم S/r التي يمكن ان نحصل منها على تقليل في الجهد الأقصى والذي هو في هذه الحالة قد بلغ الى حد 11%.

اذا كانت نقطة الهالة لكل من الموصلات الصغيرة في مجموعة متعددة مشابهة لهالة موصل منعزل فعندئذ يمكن أن نرى تأثير العامل الثاني (ب) بصورة تقريبية جداً من [3.28] بوصفه رافع جهد الهالة المرئية E_v بحوالي

$$\frac{1+0{\cdot}3r^{-\frac{1}{2}}}{1+0{\cdot}3(\sqrt{2}\,r)^{-\frac{1}{2}}},$$

عند تبديل منظومة موصل مفرد بأخرى لها موصلان / طور و

$$\frac{1+0{\cdot}3r^{-\frac{1}{2}}}{1+0{\cdot}3(2r)^{-\frac{1}{2}}}$$

لمنظومة أربعة موصلات/طور. عندما يكون $r = 1\text{cm}$ فالزيادة في E_r هي 4 و13% على التعاقب .

القياسات على منظومة موصل حزمي تؤشر كسوب فولتية أكبر من تلك المعطاة بالعاملين (أ) و (ب) (Butterworth, 1954) لذلك اذا تم اختيار S/r لمنظومة الموصلين التي نتبصر بها بحيث أن كسب الفولتية يكون 1·09 مثلاً فالكسب الفعلي قد يتعدى $1{\cdot}04 \times 1{\cdot}09$. لذلك فمن الممكن ، بأبدال الموصل الواحد بموصلين او أكثر مع مساحة المقطع الكلية نفسها ، لكي نحصل على زيادة في فولتية الهالة ، أي بأستعمال فولتية عاملة أعلى ، او لتقليل التداخل الراديوي وخسارة الهالة بالنسبة لفولتية خط معلومة . وهذا يصبح مهماً عند استعمال فولتيات نقل أعلى من 132 kV ، فمثلا نستعمل موصلين يبعد بعضهما عن بعض 30 cm سم في منظومة شبكة فائقة 275-kV ، ومنظومة 400-kV غالبا ما لها أربعة موصلات طور يبعد بعضها عن بعض مسافة 30سم .

هناك فائدة اضافية وهي إنه بما أن المحاثة قد قلت باستعمال الموصلات الحزمية كما بينا في الفصل السابق ، وازدادت السعة ، « فالحمل الطبيعي » للخط قد تمت زيادتة (انظر الفصل 1) .

اذا اهملنا ترابط الفيض المغناطيسي الداخلي ضمن الموصلات فالمحاثة / موصل L والسعة الى محايد C لخط النقل في الهواء تربطها العلاقة $LC = \mu_o \epsilon_o$ (انظر المعادلات [3.20] و [3.23] مع ابدال r_m بـ r وانظر ايضاً الجزء الثاني حيث يتم التبصر في التمور على خطوط النقل) .
السعة لذلك يجب ان تزداد بحدود نفس النسب التي قلت بها المحاثة ، فعند استعمال موصلين أو أكثر/ طور بدلاً من واحد ، اي حوالي 20 % لخط 275-kV (انظر الفصل 2) . والسعة الى محايد للتتابع الموجب يمكن حسابها باستعمال [3.20] ، مع تغيير نصف القطر الخارجي للموصل r بنصف قطر مكافيء r' النسبة r'/r تم حسابها وتمت جدولتها لقيم مختلفة للنسبة S/r حيث أن S هي المباعدة بين الموصلات المتجاورة المؤلفة لطور واحد (Butterworth, 1954) . ولكن اذا استعملنا نصف قطر مؤثر r_e والذي هو مشابه الى حد ما الى م . ب . هـ . الذاتي او م . ن . هـ لحساب المحاثة (انظر الفصل 2) بدلاً من r' ، فعندئذ لايكون الخطأ

كبيراً. لقد وجد أنه حتى لوكانت S/r واطئة الى حد 10 ، فان r_e هي أقل حوالي 2 % فقط من r' بالنسبة لموصلين أوثلاثة أوأربعة/ طور، والخطا يكون أقل للقيم الأعلى من S/r . بالنسبة لموصلين/ طور $r_e = \sqrt{(rS)}$ ولثلاث موصلات/ طورتبعد S عن بعضها البعض $r_e = \sqrt[3]{(rS^2)}$, ولأربعة موصلات / طور وعلى رؤوس مربع $r_e = \sqrt[4]{(\sqrt{2}\, rS^3)}$.

المراجع

REFERENCES

BUTTERWORTH, S. 1954. *Electrical characteristics of overhead lines.* E.R.A., Report O/T4.

CARTER, G. W. 1967. *The electromagnetic field in its engineering aspects.* Longmans, London.

MORTLOCK, J. R. & HUMPHREY DAVIES, M. W. 1952. *Power system analysis.* Chapman and Hall, London.

PARTON, J. E. & WRIGHT, A. 1965. 'Electric stresses associated with bundle conductors.' *International Journal of Electrical Engineering Education*, **3**, pp. 357–367.

STEVENS, R. A. & GERMAN, D. M. 1964. 'The capacitance and inductance of overhead transmission lines.' *ibid.*, **2**, pp. 71–81.

STEVENSON, W. D. 1962. *Elements of power system analysis.* McGraw-Hill (International Students Edition), 2nd edition.

مسائـــل

1. استنتج من المبادىء الأولية وباستعمال التقريبات المناسبة الأجهاد الكهربائـي الأعظم لخط نقل علوي معلق ثلاثي الطور 132-kV له موصل واحد / طور. كل الموصلات ذات ارتفاع متساوي البعد عن الارض ومتماثلة الموضع حول الطور الوسطي. أنصاف اقطار الموصلات هي 1·41 سم والمسافة بين الاطوار المتجاورة هي 3 أمتار. حدد بصورة مختصرة عوامل تكوين الهالة وبين ملاحظاتك حول احتمال حدوث الهالة اولاً في هذا الخط تحت ظروف التشغيل الأعتيادية. أوجد المحاثة والسعة للتتابع الموجب لكل وحدة طول لخط النقل هـــذا

(جامعة ليدز) $(9{\cdot}89\times10^{-12}$F/m ،$1{\cdot}17\times10^{-6}$H/m,13·67kV/cm;)

2. استخرج التعبير الرياضي للسعة / وحدة طول لخط نقل ذي سلكين يرتفع بمسافة مقدارها h فوق أرض ذات توصيل تام. الموصلات ذات نصف قطر مقداره r متر ويبعد بعضها عن بعض مسافة مقدارها d متر وذات بعد متساوٍ عن الأرض. أفرض أن r يقل كثيراً عن d و h.

$$\left(C = 2\pi\varepsilon_o \Big/ \log_e \frac{d^2}{r^2\left(1 + \dfrac{d^2}{4h^2}\right)} \text{ F/m}\right)$$

3. لخط النقل التالي حدد ما يلي (أ) نسبة سعة التتابع الصفري لسعة التتابع الموجب للأرض لكل موصل اذا لم يكن هناك سلك ارضي (ب) رتبة مقدار التغير بوصفة نسبة مئوية في سعة التتابع الصفري المتسبب بوساطة اضافة السلك الأرضـي. موصلات خط النقل كل منها له نصف قطر مقداره 1·3 سم وعلى ارتفاع 12 و 13·5 و 15 متراً فوق الأرض. المسافة بين موصلات الاطوار هي 5 و 6 و 7 امتار. عند اضافة السلك الأرضي فان نصف قطره سيكون 0·9 سم ويقع على ارتفاع 17 متراً فوق الأرض.

(جامعة ليدز) (6 %، 0·575)

4. سلك اسطواني مستقيم طويل ذو نصف قطر r وضع في وسط ذي سماحية ϵ موازيا لصفيحة-موصلة في المستوي الأفقي. محور السلك يبعد مسافة مقدارها

h فوق الصفيحة . اشتق العلاقة الرياضية للسعة / وحدة طول بين السلك والمستوي ، أذكر أي فرضية عملتها .

فرق الجهد بين السلك والصفيحة هو 5 kV مع $r = 0.3$ cm و $h = 12$ cm.

أحسب

(1) السعة / وحدة طول .

(2) الاجهاد الكهربائي في الوسط الذي عند السطح العلوي للصفيحة عند نقطة تبعد مسافة 20 سم من محور السلك .

$$\left(C = \frac{2\pi\epsilon}{\log_e \frac{(2h-r)}{r}}\ \text{F/m},\ 0.0127\ \mu\text{F/km (L.C.T.)}\right.$$

6.85 kV/m تعمل بصورة شاقولية الى الأسفل)

5 . احسب فولتية التمزيق الحرجة بين الموصلات لخط احادي الطور له التفاصيل التالية : قطر الموصل 1.35 سم ، المباعدة بين الموصلات 4.25 متر ، معامل الخشونة M = 0.83 درجة الحرارة 20° م ، قراءة مقياس الضغط الجوي 760 ملم زئبق (torr) ، تدرج فولتية التمزيق الحرجة للهواء = 21.1 كيلوفولت (ج . م . ت) / سم عند 25° م و 760 مملم زئبق .

(154.6 kV) (H.N.C.)

6 . اذا كانت الفولتية الحرجة بين موصلي خط احادي الطور تساوي 120 كيلوفولت لموصلات ذات قطر 1.27 سم ويبعد بعضها عن بعض مسافة 1.22 متر . فأوجد الفولتية الحرجة لموصلات ذات قطر 1.09 سم ويبعد بعضها عن بعض مسافة 2.44 متر اذا بقيت كل الظروف الأخرى بدون تغيير .

(120 kV) (H.N.C.)

الفَصلُ الرّابع

الخطوط العلوية المعلقة

OVERHEAD LINES

4.1 عوازل الخطوط العلوية المعلقة Insulators for Overhead Lines

موصلات الخطوط العلوية المعلقة ليست معزولة بنفسها لذلك فاننا نحتاج الى تركيب عوازل على ذراع مستعرض ملائم لكي تعطينا حيز الخلوص الضروري بين الموصلات ، وبين الموصلات والارض تجاه أعلى فولتية وتجاه أسوأ الظروف الجوية التي من الممكن ان يتعرض لها خط النقل . كما انه على العازل توفير الاسناد الميكانيكي الضروري للموصل تجاه اسوأ ظروف التحميل الميكانيكية المحتملة .

هناك مادتان فقط تستعملان لعزل موصلات الخطوط العلوية المعلقة المكشوفة بصورة عامة وهما الخزف والزجاج المقسى . كلتا المادتين ليست العازل المثالي فمثلا كل منهما يتعرض للتلف بسهولة نتيجة سوء التعامل ونتيجة رميها بالاحجار . يصنع الخزف من خليط متجانس صاف من طين لدن يصنع بالشكل المطلوب ويغطى بمسحة زجاجية ومن ثم يحرق في فرن . هذه العملية تنتج خزفا قاسيا جدا وناعما جدا وذو سطح صافٍ أسمر . يوصف الزجاج بانه مقسى عندما يكون سطحه في حالة انضغاط وداخلة في حالة شد . هذه الحالة يمكن ان نحصل عليها بتبريد العازل الزجاجي بسرعة بعد تصنيعه بالشكل المطلوب ويترك الداخل ليبرد ببطء . الزجاج المقسى يمكنه ان يقاوم شدا أعظم من الزجاج الملدن .

يمكن تصنيف العوازل اعتمادا على فولتية الخط المقننة للمنظومة التي ستستعمل فيها هذه العوازل ولكن فولتية التشغيل هي فولتية الخط المذكورة مقسومة على $\sqrt{3}$. تتعرض العوازل اثناء العمل كذلك الى تمورات فولتية مفرطة بسبب الصواعق

والاقلدة switching (انظر الجزء 2) . الفولتيات الدفعية التي تستعمل لتشبيه تمورات الصواعق يمكن ان نحصل عليها من مولدات دفعية تنتج فولتية احادية الاتجاه تزداد بصورة منتظمة الى فولتية الذروة في 1 مايكرو ثانية (نموذجية) وتهبط اسيا الى نصف فولتية الذروة في 50 مايكرو ثانية . الفولتيات الدفعية توصف بفولتية الذروة لها، والتي يمكن ان تكون موجبة او سالبة ، وباشكال موجاتها ، والتي يمكن ان توصف بموجة الـ 1/50 مايكرو ثانية بالنسبة للمثال المذكور اعــــلاه

اذا اهملنا العوازل الشكالية shackle الصغيرة المستعملة لتثبيت خطوط 415/240 فولت بين المساكن فيمكن تصنيف العوازل كما يلي : العازل ذو المسمار والعازل الدعامة والعازل السلسلي (يدعى كذلك بالقرصي او المعلق او الغطاء والمسمار) .

العازل ذو المسمار يكون صغيرا وبسيطا في التركيب ورخيصا ويستعمل للفولتيات الى حد 33 كيلوفولت ويكون عادة من الخزف لان الزجاج المقسى يكون اغلى سعراً . يــربط الموصل الى شق من قيمة العازل الذي يكون ملصقا على مسمار فولاذي مغلون مربوط الى الذراع المستعرض للعمود .

المناقشة التي ستتبع تنطبق على كل انواع العوازل على الرغم من ان العازل ذا المسمار قد اعطي بوصفه مثالا محددا . فاذا كان عازل ما نظيفا وجافا فمن الممكن ان يصيبه العطل في ظـرف جوي جاف لاسباب متعددة .

(أ) من الممكن ان يصيبها خرق . فولتية الخرق لاي عازل هي الفولتية التي ستخترق الخزف بين الموصل ومسمار التثبيت مسببة تحطم العازل . تقاس فولتية الخرق في فحص فولتية مفرطة بطمس العازل في زيت عازل مع تسليط فولتية 50 هيرتز عبر العازل . المواصفة القياسية البريطانية B.S. 137 تنص على ان العازل ذو المسمار ذا 11 كيلوفولت يجب ان يتحمل 95 كيلوفولت ج . م . ت . (حوالي 15 مرة بقدر فولتية الاشتغال) من دون ان يصيبه خرق — لهذا السبب يستعمل التعبير (فولتية الصمد) . العوازل يجب ان تصمم بحيث انه من المستحيل ان يصيبها الخرق .

(ب) من الممكن ان يصيبها شرر عرضي . فولتية الشرر العرضي هي الفولتية التي تسبب شرارة خلال الهواء المحيط بالعازل . الفولتية المستعملة اما ان تكون بتردد قدرة او

دفعية ، وتكون اما موجبة او سالبة : القيمة عادة ماتعطى للثلاثة كلها . مسافة الشرر العرضي الجاف تكون هي المسافة الدنيا مقاسة بشريط متوتر من المسمار الى الموصل . بالنسبة لعازل ذي مسمار 11 كيلو فولت ، تكون فولتية الصمد (الذروة) الدفعية حوالي 10.6 مضروبة بفولتية اشتغال الذروة ، وتكون فولتية صمد تردد قدرة دقيقة واحدة الجافة (ج.م.ث.) حوالي 7.9 مضروبة بفولتية الاشتغال . الاشارة الى دقيقة واحدة يعني ان فولتية الفحص يجب ان ترفع باسرع مايمكن الى القيمة المناسبة وتثبت لمدة دقيقة واحدة . فولتيات الشرر العرضي الفعلية يجب ان تكون اعظم من قيم الصمد . اذا حدث شرر عرضي لعازل اثناء الخدمة بسبب فولتية تمور فالهواء المحيط سيتأين بحيث انه يجب ان تتبعه شرارة قدره ، بسبب فولتية التشغيل ، بعد مرور التمور العابر. لهذا السبب غالبا مايثبت للعوازل قرون شرارية لابعاد شرارة القدرة عن العازل .

من الممكن ان يصبح السطح العلوي للعازل اثناء الخدمة رطبا نديا وملوثا بأتربة صناعية ، اوبرذاذ ساحلي محمل بالملح ، اوبالجليد والضباب الى المدى الذي تبدي هذه السطوح العلوية مقاومة مقللة كثيرا لتيار التسرب السطحي بسبب فولتية الاشتغال . مقاومة السطح المؤثرة تكون بسبب المسافة التدريجية المحمية والتي تمثل مجموع كل المسافات مقاسة على طول الانحناءات التي تقع تحت سطوح العازل والتي ستبقى يابسة في حالة توجيه تيار افقي مباشر على العازل ومسماره في وضع شاقولي . ان المواصفات القياسية البريطانية 137 تعطي المسافات المتدرجة الدنيا للعوازل التي تستعمل في ظروف جوية معتدلة ، وظروف تلوث شديدة وفي الحالة الاخيرة تعطينا كلا المسافتين الكلية والمتدرجة المحمية مسافات متدرجة كبيرة يمكن الحصول عليها بتصميم عازل له أكبر عدد ممكن من الظلل او الحواشي .

مسافة الشرر العرضي ، للأحوال الرطبة ، لعازل هي مجموع كل المسافات مقاسة من لحافة الخارجية للظلة وعمودية على سطح الظلة التي تحتها (أو الى المسمار أو الموصل أيهما أقل). من المعتاد تعريض العوازل الى فحص المطر الأصطناعي الموصوف في المواصفات القياسية البريطانية 137 . ولعازل ذي مسمار ١١ كيلوفولت تكون فولتية الصمد ، للأحوال الرطبة ، بتردد القدرة ، دقيقة واحدة ، حوالي 4.7 مرة بقدر فولتية الأشتغال : فولتية الشرر العرضي ، للأحوال الرطبة ، ستقاس كذلك . من الصعب

أجراء فحوص مطرية ذات دقة مقبولة لذلك فالأتجاه هو أعتماد مسافات التدريج والشرر العرضي للأحوال الرطبة المبنية على الخبرة المأخوذة من العوازل التي في الخدمة، بدلاً من الفحوص المطرية . من الواضح ان مقاومة السطح لاتعتمد على مسافة التدريج فقط ولكن تعتمد كذلك على عرض السطح والثخن وتكوين الطبقة الرقيقة الموصلة. ويعد تقليل تيار التسرب السطحي مشكلة رئيسية في تصميم العوازل وصيانتها . وعازل ذو تصميم جيد وذو طبقة صافية سقيلة صلدة وناعمة خال من التشققات والخدوش يستعمل في مناطق قليلة التلوث سيحتاج الى صيانة قليلة خصوصاً اذا كان سقوط المطر بدرجة كافية لكي تحافظ على العازل نظيفاً . النوع الثاني من العوازل التي تم ذكرها هو العازل الدعامة . هذا العازل مشابه للعازل ذي المسمار ولكن له قاعدة معدنية وغالباً مايكون له غطاء معدني لكي يكون من الممكن تركيب وحدة أخرى معه على التوالي . يمكن جعل مسافة التدريج كبيرة بأستعمال ظلل مماثلة لبعضها خصوصاً للعوازل التي تستعمل في الخارج . العازل الدعامة له سعة منخفضة وله تدريج فولتية منخفض عند الموصل المكهرب بحيث ان فولتية الهالة تكون عالية (انظر الفقرة 3.8) . عوازل الدعامة ذات القطر الصغير (حوالي 15 سم أو أقل) تكون صلدة ولكن الأقطار الأكبر غالباً ماتكون مجوفة ومملوءة بوسط عازل، عادة مايكون زيتاً لايتأثر بالرطوبة . عوازل الدعامة المثبتة لموصل خط علوي معلق تدعى بعوازل دعامة الخط . عوازل الدعامة تجهز بقرون شرارية أحياناً ويمكن أن تستعمل لأعلى الفولتيات .

النوع الثالث من العوازل هو وحدة العازل السلسلة الذي يتكون من ظلّه واحدة من الخزف او الزجاج المقسى لها عدة حواشٍ في الأسفل . عدد ومسافة تدريج الحواشي تزداد لوحدة العازل التي ستستعمل في المناطق الشديدة التلوث والعرضة للضباب. وكل عازل ملصق الى غطاء معدني من الأعلى ومسمار معدني (اوكرة) من الأسفل. بحيث أنه يمكن ربط عدة وحدات بعضها مع بعض بوساطة مفاصل كروية حقّية لتكون سلسلة العازل هذه السلسلة قابلة للأنثناء وتعلق بصورة شاقولية ونختار عدد وحدات العازل في السلسلة لتناسب فولتية المنظومة (عادة ماتكون 66 كيلو فولت وأعلى). والتلوث محتمل الحصول . بما أن السلسلة قابلة للأنثناء ، يجب أن نضمن وجود حيز كاف فيما بين الموصلات المكهربة، وبين الموصلات المكهربة والمعادن المؤرضة عندما تهتز السلسلة عرضيا الى الخط ، بسبب الريح. تستعمل وحدات السلسلة كذلك لأخفض فولتيات المنظومة والى الفولتيات الأعلى لتربط طرفي الخط الى الأبراج الطرفية . وكذلك لتربط طرفي

الخط الى البرج الزاوي عندما يكون هناك تغيير محسوس في اتجاه الخط . مثل هـــذه العوازل تدعى سلاسل الشد ، وتكون محاورها أفقية تقريباً .

عندما تتضرر وحدة عازل من الزجاج المقشى فأنها ستتقسم الى قطع صغيرة ، وبذلك يكون من السهولة أكتشافها : ولـكن من الضروري أن يمسك الرابط السمنتي بين المسمار والغطاء أو أن الخط سيسقط مما سيجعل ارتفاع حيز الخلوص عن الأرض أقل من الحـد القانوني المسموح به .

4.1.1 توزيع الفولتية على سلسلة العوازل

VOLTAGE DISTRIBUTION OVER AN INSULATOR STRING

المشكلة الرئيسية لعوازل السلسلة هي توزيع الفولتية على السلسلة . سلسلة ذات وحدات عازل مماثلة لبعضها ، ونظيفة ، وجافة ولايوجد أي جسم معدني قريب عليها (عدا الموصلات الرفيعة التي تسلط الفولتية عبر السلسلة) ستقتسم الفولتية المسلطة بالتساوي على وحدات العازل ، لأن هذه الوحدات ستفعل بوصفها مقسم فولتية سعياً . ولـكن فـي الأستعمال الفعلي يكون لـكل نقطة تربط الغطاء المعدني والمسمار سعة الى البرج المؤرض ، انظر شكل *4.1*. من المعتاد الفرض أن هذه السعات تكون متساوية جميعاً وذات قيمة تساوي kC. حيث أن C هي السعة لـكل وحدة في السلسلة k تتراوح عادة بين 0.1 و 0.2 . العلاقة الرقمية بين الفولتية عبر السعة والتيار المار بها تكون كمايلي :

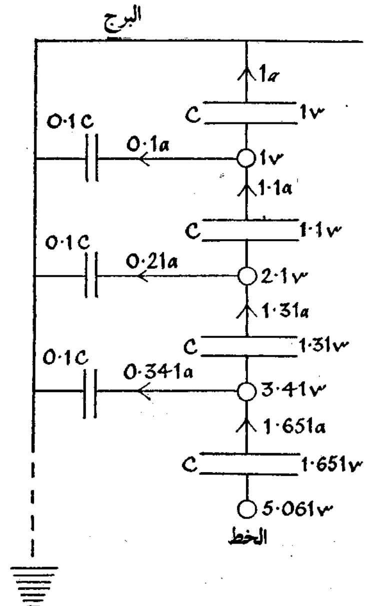
$$I = 2\pi fCV \qquad [14.1]$$

اذن

$$I \propto C \text{ for fixed } V \qquad [4.1ب]$$

$$V \propto I \text{ for fixed } C. \qquad [4.1ج]$$

يمكننا حساب توزيع الفولتية بفرض أن وحدة العازل طرف البرج تأخذ وحدة واحدة للتيار لاعلي التعيين (يرمز لها 1 *a*) ووحدة واحدة للفولتية لاعلى التعيين (1 *v*) .



شكل 4.1 كفاءة السلسلة

اذا أخذنا $k = 0{\cdot}1$ مثلاً عندئذ بأستعمال المعادلة [4.1b] ، سيكون التيار في السعة المتفرعة العليا $0{\cdot}1\ a$. وهكذا فسيكون التيار في وحدة العازل الثانية $1{\cdot}1\ a$ وبأستعمال المعادلة [4.1c] ، ستكون الفولتية عبرها $1{\cdot}1\ v$. لذلك من الممكن ايجاد الفولتية النسبية عبر كل وحدة وعبر كل السلسلة . من الواضح أن وحدة العازل في طرف الخط تأخذ الحصة الأكبر من الفولتية الكلية . اذا أفترضنا أن الشرر العرضي على وشك الحدوث في هذه الوحدة ، فعندئذٍ يكون على وشك الحدوث في السلسلة كلها.

كفاءة السلسلة تعرف (بنسبة الوحدة) بالنسبة

$$\frac{\text{فولتية الشرر العرضي للسلسلة}}{n \times \text{فولتية الشرر العرضي لوحدة عازل واحدة}} \qquad [4.2]$$

حيث أن n هي عدد الوحدات في السلسلة ، في المثال أعلاه تكون كفاءة السلسلة هي :

$$\frac{5\cdot061 \times 100}{4 \times 1\cdot651} = 76\cdot8\%.$$

وكفاءة السلسلة تقل كلما ازداد عدد وحدات العزل .

يمكن تحسين كفاءة السلسلة بتقليل السعة الفرعية نسبة الى السعة لكل وحدة . هناك طريقة ثانية لتحسين الكفاءة بزيادة سعة كل وحدة من طرف البرج بأتجاه طرف الخط ، ولكن هذه نادراً ماتستعمل لأن ذلك سيشمل أستعمال وحدات أحتياطية مختلفة لكل وحدة عازل ، وهذا يتعارض مع الأتجاه القاضي بجعلها قياسية والأقتصار على أقل الأنواع الممكنة . يمكننا أن نحصل على زيادة في الكفاءة بتغيير قرون الشرارة في طرف الخط بحلقة تدريج . هذا سيؤدي الى زيادة السعة المؤثرة لوحدات العازل القريبة من طرف الخط ، ولكن تأثيرها يتلاشى كلما ازداد عدد وحدات السلسلة. الحسابات المبنية على هذه الطريقة تشتمل عادة على تغيير مجموعة السعات ذات الربط المثلثي الى مجموعة ربط نجمي ، بأستعمال الصيغة المعطاة في الملحق 2 .

توزيع الفولتية على سلسلة عازل طويلة جداً يمكن أن تحلل بأستعمال نظرية الخط الطويل المنتظم (أنظر الفقرة 1.3.2) بتغيير لفظ لكل كيلومتر وجعله لكل وحدة عازل ، ولكن الطالب يجب أن يتبصر من الناحية العملية ، فيما اذا كانت السعات الفرعية بين معدن المسمار والغطاء وبين البرج منتظمة ، خصوصاً قرب طرف البرج من السلسلة. بما أن السعات المتفرعة هي السبب في عدم انتظام توزيع الفولتية على سلسلة عازل نظيفة وجافة فأن رفع المعدن بين وحدات العازل يبدو حلاً ممكناً للمشكلة. مثل هذه العوازل التي هي قطعة واحدة ، او قضيب طويل ، قد أستعملت بنجاح في بعض الاحيان. وهذه هي ، في الحقيقة ، العوازل نوع الدعامة المعلقة من الغطاء العلوي .

طرققة الحساب أعلاه تفترض أن توزيع الفولتية يعتمد كلياً على تأثيرات السعة، أي أن العوازل نظيفة وجافة . ولكن من ناحية ثانية اذا كانت وحدات العازل ملوثة كثيراً ، فأن تيارات التسرب السطحي (المقاومة) يمكن أن تكون أكبر من تيارات السعة . ومدى التلوث يمكن أن يتغير من وحدة عازل الى أخرى ، مؤدياً بالتالي الى صعوبة التنبؤ بتوزيع الفولتية . لذلك من المهم تنظيف أنواع العوازل كافة بأنتظام .

الطريقة الأخرى لتحسين توزيع الفولتية تكون بأستعمال طلاءسقيل ذي مقاومة عالية نصف موصل (اومركز) على وحدات العازل محاولة لأعطاء تأثير مفسم – فولتية مقاومي (وصف النصف الموصل ليس له المعنى الذي يصاحب عادة الاجهزة الالـكترونية).

في محاولة للتغلب على مشكلة تلوث السطح ، تغطى بعض العوازل بطبقة خفيفة من دهن السيليكون الذي يمتص الاوساخ ويحول الماء النازل على سطح العازل الى قطرات بدلا من ان يكون طبقة رقيقة .

4.2 مواد الموصل للخطوط العلوية المعلقة

Conductor Materials for Overhead Lines

موادالموصل التالية تستعمل عموماً في الخطوط العلوية المعلقة : نحاس مسحوب صلد (HD) ذو توصيل عالٍ (HC) ، نحاس – كادميوم مسحوب صلد، ألمنيوم مسحوب صلد وسبيكة ألمنيوم ، ألمنيوم ذو لب فولذي (SCA) . البيانات القياسية ذات العلاقة بهذه المواد وبالموصلات القياسية المصنوعة من هذه المواد معطاة في المواصفات القياسية البريطانية المخصصة لها .

يمكننا القول أن أهم خاصية لمادة موصل خط علوي معلق هي علو قوة الشد (حمل قطع عالٍ) بحيث أن البون بين الأبراج (أو الأعمدة) يكون أطول مايمكن والتدلي أقل مايمكن (أنظر الفقرة 4.3) ،وبذلك نقلل عدد هذه الأبراج وأرتفاعها وعـدد العوازل المستعملة . يجب أن تكون للموصل مقاومية واطئة لـكي تقلل من خسائر الـ I^2R ومن هبوط الفولتية . كما يجب أن تكون الـكلفة الـكلية التي تشمل كلفة النصب والصيانة قليلة . احدى النقاط المهمة هنا هي العمر المتوقع للموصل . والأختيار النهائي لمادة الموصل غالباً مايكون هو التوفيق بين كل ماذكر سالفاً .

من الثابت أن موصلات الخطط العلوية المعلقة تكون مجدولة لكي تكون أكثر قابلية للثني خلال النصب وعندما تكون في الخدمة . اغلب الموصلات يكون لها سلك مركزي واحد ، والطبقة الاولى لها، أسلاك ، والطبقة الثانية لها12 سلـكا والتي تليها18 سلـكاً وكل طبقة تزيد على التي قبلها بستة أسلاك (على فرض أن كل الأسلاك لها قطر متساوٍ كما هي العادة) . تبرم كل طبقة باتجاه يعاكس الطبقة التي قبلها (تكون الطبقة الخارجية باتجاه اليمين دائماً) لكي تزيد بذلك القوة الميكانيكية الكلية للموصل .

يمكن أن تتآكل الموصلات بسبب التفاعلات الكيمياوية مع الجو الملوث ، أو بسبب الأكسدة أو بسبب الفعل الكهرو–كيمياوي بين المواد المختلفة في الألكتروليت بسبب رذاذ الملح او حامض الكبريتيك أو بسبب ثاني اوكسيد الكبريت في الجو .

عند مضي فترة من الزمن على الموصلات في العمل تميل سطوحها الى الخشونة بسبب التآكل والتلوث وفي حالة الرياح الدوامية فان هذه الموصلات تميل الى الاهتزاز أو الارتعاش بتردد عالٍ نسبياً (10 هيرتز) وذي قيمة ذروة واطئة . تدور الموصلات أحياناً بصورة غير منتظمة وبتردد واطيء (1 هيرتز) ولكن بقيمة ذروة عالية ، وقد تكون هذه بسبب الطبقة المغلفة الثلجية . في حالة سقوط الثلج المغطي للموصل بصورة مفاجئة ، سيقفز الموصل الى الأعلى بسبب مرونته . مثل هذه العوامل يجب أن تؤخذ بنظر الاعتبار في تقرير المباعدة بين الموصلات . الموصلات يجب ان لاتكون متقاربة بدرجة تسمح بحدوث شرر عرضي فيما بينها . مباعدة الموصل وقطره الكلي يؤثران على المحاثة ،

والسعة وعلى فولتية بداية الهالة . والاختيار النهائي لهما (المباعدة والقطر) ، معرض الى عدة اعتبارات تقنية واقتصادية . المباعدة يجب ان تبقى بالحد الادنى على ان تـكون منسجمة مع الاعتبارات المذكورة أعـلاه ، خصوصا بالنسبة لخطوط الفولتيـة الواطئة : أما بالنسبة لخطوط الفولتية العالية ، فمن المستحسن استعمال قطر كلي كبير (مثلا موصلات الحزمة ، انظر القوة 3.9) . أغلب مواد الخطوط العلوية المعلقة تكون مسحوبة – صلدة ، حمل التيار الدوري لموصل يجعل السلك ميالا الى اللدونة وهذا ، جنبا الى جنب مع التأثير المناظر على عقد الموصل ، يؤثر على التيار المقنن للخط . قابلية الموصل لتبديد الحرارة تعتمد على محيطه ، وعلى درجة حرارة المحيط والريح والاشعاع الشمسي . للخطوط تيار مقنن للاجواء الباردة والاعتيادية والحارة ، ومقنن حمل مفرط لعشر دقائق وعشرين دقيقة ، ومقنن تيار عطل لزمن قصير .

في البيانات المدرجة أدناه ، أخذت درجة الحرارة القياسية على انها 20 مئوية .

نحاس لدن ذو موصلية – عالية *High-conductivity annealed copper*

رغم ان هذه المادة المصفاة الـكتروليتياً لاتستعمل للخطوط العلوية المعلقة ، فان خواصها الكهربائية غالبا ماتؤخذ مرجعا قياسيا .

المقاومية = $1/58 = 0{\cdot}01724$ اوم – ملم^2/ م اومايكرواوم – م

= $1{\cdot}724$ مايكرواوم – سم

يقال عن هذه المادة انها ذات موصلية 100%

معامل درجة الحرارة للمقاومة عند 20 مئوية (لكتلة ثابتة) $1/254{\cdot}5 = 0{\cdot}00393$ لكل درجة مئوية

الكثافة عند 20° مئوية = $8{\cdot}89$ غرام / سم³ = 8890 كغم / م³

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل درجة مئويه

(ملاحظة : في هذا الفصل كله اخذت α على انها علامة لمعامل التمدد الخطي وليس معامل درجة الحرارة للمقاومة . المواصفات البريطانية القياسية 1991 تورد α علامة لـكليهما).

نحاس مسحوب صلد ذو موصلية عالية *Hard-drawn high-conductivity copper*

الاسلاك المسحوبة الصلدة لهاقوة ميكانيكية عالية ولكنها كذلك ذات مقاومية أعلى من السلك اللدن .

الكثافة = $8{\cdot}89$ غم / سم³

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل م°

معامل يونك Young للمرونة $E = 1{\cdot}24 \times 10^{11}$ نيوتن / م²

لتيار مقنن معلوم تكون للنحاس موصلية عالية وقطر كلي صغير ، نسبة الى المواد البديلة . لذلك يكون حمل الريح المستعرضة والثلج على الموصل قليلا ولكن فولتية بدء الهالة تكون واطئة أيضا (أنظر الفقرة 3.8) لذلك لايناسب النحاس خطوط الفولتية العالية جدا . وللنحاس قوة شد واطئة نسبيا وهذا يعني أنه لايمكن استعماله الا عندما تكون الابوان قصيرة . للنحاس عمر طويل جدا لانه لايتعرض لاي شكل من اشكال التآكل .

نحاس كادميوم مسحوب صلد *Hard-drawn cadmium copper*

اضافة 1 % كادميوم الى النحاس يرفع قوة الشد ولكن على حساب الموصليـــــة .

المقاومية (القصوى) = $2{\cdot}177$ مايكروأوم – سم

الموصلية (الدنيا) = $(1{\cdot}724/2{\cdot}177)100 = 79{\cdot}2$ %

الكثافة = $8{\cdot}945$ غم / سم³

معامل التمدد الخطي $\alpha = 17 \times 10^{-6}$ لكل م°

معامل يونك للمرونة E = $1{\cdot}24 \times 10^{11}$ نيوتن / م^2

يستعمل نحاس الكادميوم للأبوان المتوسطة ولكنه ، كما في النحاس ، لايلائم الفولتيات العالية كما أنه أغلى من النحاس . لكن نتمكن من اعطاء مقارنة سريعة بين مختلف أنواع الموصلات . نقول ان مساحة النحاس المكافئة (م . ن . مك) تعرف بانها تلك المساحة من النحاس المسحوب الصلد المصمت التي لها المقاومة نفسها لكل وحدة طول كما للموصل . لذلك فموصل نحاس كادميوم موصوف بانه 1·13 سم^2 (م . ن . مك .) 19/0·3 سم^2 . له مقطع فعلي مقداره 1·34 سم^2 . يجب ان لانخلط بين الـ (م . ن . مك .) والمساحة المحسوبة (المعطاة في جداول المواصفات القياسية البريطانية B.S.S.) والتي هي مساحة نحاس الكادميوم المصمت . ذي الموصلية نفسها . والذي له المقاومة ذاتها لكل وحدة طول كما للموصل المجدول .

ألمنيوم مسحوب صلد *Hard-drawn aluminium*

المقاومية (القصوى) = 2·826 مايكروأوم — سم

الموصلية (الدنيا) = 61·1 %

الكثافة = 2·703 غم / سم^3

معامل التمدد الخطي α = 23×10^{-6} لكل م°

معامل يونك للمرونة E = $6{\cdot}6 \times 10^{10}$ نيوتن / م^2

تتغير بيانات الالمنيوم اعتمادا على نقاوته وتاريخه الفيزياوي السابق . يتجه الى استعمال الالمنيوم (وبخصوصية أكثر لقابلوات تحت الارض) عندما يكون سعر النحاس عاليا . مقارنة الالمنيوم بالنحاس تعتمد على أسس المقارنة . مثلا وزن متساوومقاومة متساوية او سعة حمل تيار متساوية من وجهة نظر تبديد الحرارة . للالمنيوم قوة شد واطئة لذلك يستعمل للابوان القصيرة فقط . وبما أن له مقطعا أكبر عموما فانه يتعرض لتحميل رياح وثلج أعلى . والالمنيوم يتعرض للتآكل بسبب الظروف الجوية .

سبيكة المنيوم مسحوبة صلدة *Hard-drawn aluminium alloy*

اضافة نسبة تقارب ½ % من كل من السيليكون والمغنيسيوم تزيد مقاومة التآكل وكذلك تزيد قوة الشد على حساب الموصلية . سبيكة الالمنيوم يمكن ان تستعمل لابوان اطول قليلا مما يمكن استعماله للنحاس المسحوب الصلد .

المقاومية (القصوى) = 3·25 مايكروأوم — سم

الموصلية (الدنيا) = 53 %

الكثافة = 2·70 غم / سم^3 .

معامل التمدد الخطي $\alpha = 23 \times 10^{-6}$ لكل م°

معامل يونك للمرونة $E = 6{\cdot}8 \times 10^{10}$ نيوتن / م^2

الالمنيوم ذو اللب الفولاذي (أ . ل . ف) *Steel-cored aluminium (S.C.A.)*

يتجه الى استعمال هذا النوع موصلا قياسيا عند الفولتية 132 كيلو فولت وأعلى . فمثلا لموصل (أ . ل . ف .) 2·6 سم^2(م ن . مك) و 7/54/0·32 سم فتيلة فولاذية مركزية محاطة بطبقة من 6 فتائل فولاذية ، ثم ثلاث طبقات من الالمنيوم ذوات 12 , 18 و 24 فتيلة على التوالي ، وكل منها ذات قطر 0·32 سم . الفولاذ يعطي قوة الشد الميكانيكية الضرورية . الالمنيوم يعطي الموصلية الكهربائية أما موصلية الفولاذ فانها تعتبر مهملة .

بيانات الفولاذ المغلفن تكون كما يلي :

الكثافة = 7·8 غم / سم^3

معامل التمدد الخطي $\alpha = 11{\cdot}5 \times 10^{-6}$ لكل م°

معامل يونك للمرونة $E = 1{\cdot}93 \times 10^{11}$ نيوتن / م^2

الفولاذ والالمنيوم كلاهما يتأكسد بسبب الاوكسجين الموجود في الجو والفعل الالكتروليتي (التآكل)يمكن أن يتم بين الزنك والالمنيوم في مناطق التلوث الصناعي ورذاذ الملح . لهذا السبب توضع طبقة من الشحم بين الفولاذ والالمنيوم عند تصنيع الموصل .

يستعمل أ . ل . ف للابوان الطويلة . بسببقوته . لكي يحد من التدلي ويقلل من عدد الابراج المستعملة . قطـرهالـكبيـر يؤدي الى زيادة في تحميل الريح والثلج ولكنه كذلك يزيد فولتية بدء الهالة .

طبقات الالمنيوم الحاملة للتيارهي في الواقع ملفات لولبية طويلة مسحوبة لذلك هناك مجال طولي داخل الموصل يمغنط اللب الفولاذي . بما أن الطبقات المتناوبة للألمنيوم ملفوفـة باتجاهات متعاكسة يكون المجال المغناطيسي لـكل طبقة معاكساً (ولـكن لايلغي ذلك) للطبقات المجاورة . ترابط الفيض الداخلي والمحاثة لموصل مصمت كانت قد نوقشت في الفقرة 2.2.1 على أساس أن التيار موزع بأنتظام على مقطع الموصل . من الواضح أن هذه النظرية البسيطة لايمكن تحقيقها بالنسبة لموصل أ . ل . ف .

4.2.1 معامل المرونة التقديري لموصل أ . ل . ف .

VIRTUAL MODULUS OF ELASTICITY OF S.C.A.

معامل يونك للمرونة E يعرف بأنه $E = \frac{\text{الأجهاد}}{\text{المطاوعة}}$. ويطبق الى حد نهايـــة المرونة للمادة . أي عندما تتناسب المطاوعة والأجهاد . وهكذا فأن E تساوي كذلك التغير في الأجهاد / التغير المناظر في المطاوعة . لقد تم أعطاء قيم E للفولاذ والألمنيوم: المشكلة الآن هي ايجاد القيمة التقديرية E_v للموصل المركب كما في الأ . ل . ف.

لنفترض أنه عند كل نهاية لطول معين في الموصل تم شبك الفولاذ والألمنيوم بصورة مضبوطة بحيث أنه لايمكن أن يحصل أي انزلاق بين المادتين . عندئذ أي مطاوعة يجب ان تكون متساوية بالنسبة للفولاذ والألمنيوم والموصل المركب. اذا كان الموصل . خالياً ابتداء من أي قوة شد . وسلطنا عليه قوة F فأن

$$F = f_s A_s + f_a A_a$$

حيث أن f = الأجهاد و A = مساحة المقطع . ومعدل الأجهاد يكون

$$(f_s A_s + f_a A_a)/(A_s + A_a)$$

والمطاوعة = $f_s/E_s = f_a/E_a$ والمعامل التقديري يمكن تعريفه كمايلي

$$E_v = \frac{\text{معدل الأجهاد}}{\text{المطاوعة}}$$

$$= \frac{(f_s A_s + f_a A_a)E_s}{(A_s + A_a)f_s}$$

$$= \frac{A_s E_s + A_a E_a}{A_s + A_a}. \qquad [4.3]$$

4.2.2 المعامل التقديري للتمدد الخطي لموصل أ . ل . ف ..

VIRTUAL COEFFICIENT OF LINEAR EXPANSION OF S.C.A.

معامل التمدد الخطي α لمادة ما هو الزيادة في الطول لكل وحدة طول لكل وحدة ارتفاع في درجة الحرارة . اذا أخذنا الطول l فالزيادة ستكون δl عندما ترتفع درجة الحرارة بمقدار $\delta\theta$ وعندئذ

$$\alpha = \delta l/(l \, . \, \delta\theta).$$

لنفترض أن $l = 1$ ، $\delta\theta = 1$ لتسهيل الحل ، فعندئذ $\alpha = \delta l$. تبصر في وحدة طول من موصل أ . ل . ف ممتد على سطح عديم الأحتكاك أفقي مثبت عند أحدى نهايتيه وسلطت عليه قوة توتر F عند النهاية الأخرى : كما ذكرنا سابقاً فأن النهايات تكون مشبوكة بحيث أنه عند كل نهاية لاينزلق أي من الفولاذ أو الألمنيوم بالنسبة للآخر. افرض ان درجة الحرارة قد ارتفعت درجة واحدة . عندئذ يجب أن يتمدد الفولاذ بمقدار α_s والألمنيوم بمقدار α_a . ولكن أي تغير في الطول سيحدث تغييراً في الأجهاد . أفرض أن أجهاد التوتر في الفولاذ والالمنيوم يزداد بمقدار δf_s و δf_a على التعاقب بينما لم تتغير القوة المسلطة بحيث أن $\delta f_s A_s + \delta f_a A_a = 0$. وبسبب الزيادة في أجهاد التوتر فالزيادة المناظرة في الطول تكون $\delta f_s/E_s$ و $\delta f_a/E_a$. التغير الفعلي في طول الفولاذ والألمنيوم والأ . ل . ف . يجب ان تكون متساوية ولذلك

$$\alpha_s + \delta f_s/E_s = \alpha_a + \delta f_a/E_a = \alpha_v$$

. حيث ان α_v هو التغير في طول الأ . ل . ف لكل وحدة طول لكل وحدة ارتفاع في درجة الحرارة ، اي ان معاملها التقديري ذو تمدد خطي . على الطالب ان يثبت انه اذا حذفنا δf_s و δf_a فسنحصل على مايلي

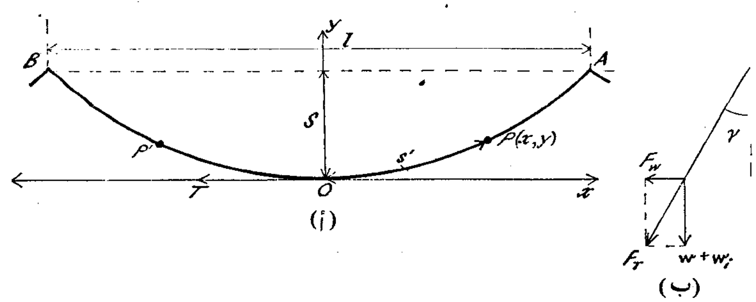
$$\alpha_v = \frac{\alpha_s A_s E_s + \alpha_a A_a E_a}{A_s E_s + A_a E_a}. \qquad [4.4]$$

4·3 حسابات التدلي والأجهاد Sag and Stress Calculations

4·3·1 القطع المكافيء Parabola

شكل 4.2 (أ) يبين خطاً علوياً معلقاً بين نقطتين مثبتتين في مستوى واحد A و B .

لنفترض ان الخط مرن تام ويتدلى تحت المستوى AB بسبب وزنه المنتظم . هيأة الخط



شكل 4.2 (أ) نمط قطع مكافيء (طول القوس $P'OP = s = 2s'$) .
(ب) تأثير قوة الريح F_W

لذلك ستكون بشكل منحنى سلسلي (انظركتب الرياضيات ذات العلاقة والفقرة 4.3.4) فيما عدا خطوط الجهد الفائق ذات البون الطويل والتدلـي الكبير. فمن المعتاد وبدقــة كافية أن نفترض أن الخط مشدود الى درجة بحيث أن هيأته تكون على شكل قطــع مكافيء $y = ax^2$ حيث أن a هي ثابت لخط معين . و O هي نقطة الأصل .

أفرض أن l = البون = المسافة الأفقية بين الأعمدة بالمتر

S = التدلي عند منتصف البون بالمتر

عندئذ $y = S$ عندما تكون $x = l/2$ و

$$a = 4S/l^2 \qquad [4.5أ]$$

$$y = 4S(x/l)^2. \qquad [4.5ب]$$

تبصر الآن في توازن نصف الخط OA .

أفرض أن T = الشد (نيوتن) عند O (يفترض أنها ثابتة على طول البون)

w = وزن الموصل نيوتن / م

اذا افترضنا أن الموصل أفقي تقريباً وأخذنا العزوم حول A فستكون $TS = (wl/2)(l/4)$ ومن ثم

$$S = wl^2/8T \qquad [4.6]$$

وبحذف S بين المعادلتين [4.5ب] و [4.6] نحصل على

$$y = wx^2/2T \qquad [4.7أ]$$

و

$$a = w/2T. \qquad [4.7ب]$$

أنظمة الخطوط العلوية المعلقة قد بينت ارتفاع حيز الخلوص الأدنى للخطوط التي فوق الأرض واذا أضفنا التدلي الى ذلك فيمكننا عندئذ ايجاد ارتفاع نقاط تثبيت العازل A و B . تنص الأنظمة على أن التدلي يجب أن يحسب تحت أسوأ الظروف الموصوفة وبالتحديد : يكون الخط عند درجة حرارة 22° فهرنهايت ومغطى بالثلج بسمك عرضي مقداره 0·96 سم ويزن الثلج 8900 نيوتن / م^3 وفي آن واحد يتعرض الى ريح بسرعة 80 كم / ساعة وبزاوية قائمة على الخط بحيث ان الضغط على الخط يكون 378 نيوتن / م^2 من المساحة الكلية المعرضة . كما ويجب ان لا يزيد الشد الأقصى في الخط تحت هذه الظروف على نصف شد القطع للخط . سنفترض في الوقت الحاضر ان الشد ثابت عند كل النقاط على طول الخط الموتر أما تغير الشد على طول الخط فسنناقشه في الفقرة 4.3.4. لأنظمة نفسها تطبق على خطوط الفولتية المتوسطة / الواطئة ما عدا سمك الثلج حيث أنه سيقل الى 0·48 سم .

التعقيدات العملية هي أن الخطوط ستشيد تحت ظروف أكثر دفئاً وهواء ساكن تقريباً ومع ذلك فانها يجب ان تمتثل لأسوء الظروف المذكورة أعلاه . تبصر الان في طول l متر من الموصل .

أفرض أن d = قطر الموصل . بالأمتار

t = السمك العرضي للثلج . بالأمتار

D = القطر الكلي للموصل المغطى بالثلج $= d + 2t$ متر

قوة الريح على الموصل هي (أنظر شكل 4.2. ب)

$$F_W = 378 \text{ D N/m} \qquad [4.8]$$

وزن الثلج على الموصل هو

$$\begin{aligned} w_i &= (D^2 - d^2) \quad 2225\pi \\ &= 2{\cdot}8 \times 10^4 t\,(d + t) \text{ N/m} \end{aligned} \qquad [4.9]$$

انحراف الموصل عن المستوي الشاقولي بزاوية مقدارها γ .

افرض أن F_T = القوة الكلية الفاعلة على الموصل لكل متر من الموصل

$$= \{F_W^2 + (w + w_i)^2\}^{\frac{1}{2}} \text{ N/m} \qquad [4.10]$$

F_T يجب أن تقع في المستوي الجديد للموصل . و

$$\tan \gamma = F_W/(w + w_i). \qquad [4.11]$$

ما تزال المعادلات[4.5 أ] الى[4.7 ب]ممكنة التطبيق على شرط ان كل القياسات

قد اجريت في المستوي الجديد للموصل و w قد تم تبديلها بـ F_T . اذا كانت F_T هي القوة الكلية لكل متر على الموصل تحت أسوأ الظروف و T هي الشد النهائي المعرف بالانظمة فعندئذ يكون التدلي في المستوي الجديد، من المعادلة [4.6] ، هو

$$S = F_T l^2/8T \qquad [4.12]$$

والتدلي المقاس شاقوليا يكون $S\cos\gamma$.

من الضروري الآن ان نحصل على تعبير رياضي تقريبي للطول الفعلي (المنحني) لنصف الخط (s') مفترضين أنه على شكل قطع مكافىء . تبصر في مثلث قائم الزاوية صغير على القطع المكافىء $y = ax^2$، فعندئذ

$$(ds')^2 = (dx)^2+(dy)^2$$
$$(ds'/dx)^2 = 1+(dy/dx)^2 = 1+4a^2x^2$$
$$ds' = (1+4a^2x^2)^{\frac{1}{2}}dx \simeq (1+2a^2x^2)dx.$$

بما أن $a = 4S/l^2$ تكون صغيرة . فبالتكامل

$$s'_x = x+(2a^2x^3/3)+c$$

حيث ان $c = 0$ لأن $s' = 0$ عندما $x = 0$ وهكذا فان

$$s'_x = x+2a^2x^3/3. \qquad [4.13]$$

لاحظ أن s'_x هي المسافة المنحنية من O الى $P(x,y)$. اذا كانت s هي المسافة المنحنية المضاعفة $2s'_x$ فان الطول المنحني الكلي للقطع المكافىء يكون . من المعادلة [4.5 أ]

$$s = l+8S^2/3l. \qquad [4.14]$$

وبالتعويض من المعادلة [4.12] . فان طول المنحنى الكلي يكون

$$s = l(1+F_T^2l^2/24\,T^2). \qquad [4.15]$$

اذا تعرض خط الى مجموعة ظروف فيزياوية يشار اليها بالرمز السفلي 1 ثم تعرض الى مجموعة ظروف فيزياوية أخرى يشار اليها بالرمز السفلي 2 فيمكننا اشتقاق علاقة بينهما وكما يلي . اذا ازدادت T_1 الى T_2 عندئذ ستكون استطالة الموصل $s_1(T_2-T_1)/\ AE$ حيث ان A in^2 هي مساحة مقطع الموصل . اذا زادت درجة الحرارة من θ_1 الى θ_2 فان تمدد الموصل سيكون $\alpha s_1(\theta_2-\theta_1)$.

وهكذا فان

$$s_1+s_1(T_2-T_1)/AE+\alpha s_1(\theta_2-\theta_1) = s_2 \qquad [4.16 أ]$$

وبالتعويض عن s_1 و s_2 من المعادلة [4.15] ، وباستعمال مفكوك ذي حدين وباهمال حدود الدرجة الثانية ، فالمعادلة [4.16 أ] ستقل الى

$$(l^2/24)(F^2_{T2}/T_2^2-F^2_{T1}/T_1^2) = (T_2-T_1)/AE+\alpha(\theta_2-\theta_1) \qquad [4.16 ب]$$

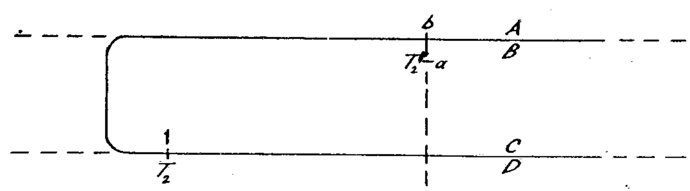
المسألة العملية هي حل المعادلة [4.16 ب] لايجاد T_2 ، باعادة ترتيبها كما يلي .

$$T_2^2[T_2-\{T_1-\alpha AE(\theta_2-\theta_1)-AEF^2_{T1}l^2/(24T_1^2)\}] = AEF^2_{T2}l^2/24 \qquad [4.17]$$

المعادلة [4.17] تعطى شد النصب T_2 وكأنه في حالة تعرض الخط الى أسوأ الظروف (كما وضعت في الأنظمة) ، فان الشد على الخط سوف لا يتعدى T_1 والذي هو نصف حمل القطع للخط . التدلي وارتفاع الخط فوق الأرض (ارتفاع حيز الخلوص) عندوقت التشييد يجب أن تصمم بحيث ان ارتفاع حيز الخلوص سوف لا يصل الى أقل من الحد الادنى القانوني عند أي زمن مستقبلي .

المعادلة [4.17] يمكن ان تكتب بالشكل التالي

$$T_2^2 (T_2 - a) = b. \qquad \dots [4\cdot18]$$



شكل (4.3) حل المعادلة التكعيبية

هذه المعادلة التكعيبية يمكن ان تحل باستعمال المسطرة الحاسبة . باستعمال التدريجات A و B و C و D (انظر الشكل 4.3) . اجعل المنزلقة عند b على التدريج A وعدل المسطرة بالتجربة حتى يكون الرقم على التدريج D المعاكس لـ 1 أو 10 على التدريج C (T_2) بحيث يكون الرقم تحت المنزلقة على التدريج B هو T_2-a . اذا كانت $b = 75$ مثلاً . فسنجد أن هذه الطريقة تعطينا الأرقام المهمة نفسها لـ T_2 سواء أخذنا بوصفها 75 أو 7·5 .

4·3·2· أبوان ذات اطوال غير متساوية : البون المكافيء

Span of Unequal Length: Equivalent Span

عند تعليق خط يتألف من عدة اجزاء ذات مسافات غير متساوية على عوازل التثبيت الخاصة بها فانه من المستحسن جداً ان تعلق هذه العوازل بصورة شاقولية .وهكذا عند كل نقطة تثبيت ، يجب أن تكون المركبات الأفقية للشد ، للأجزاء المتجاورة متساوية . اذا علقنا كل جزء طبقا للصيغة التي أوجدت في الفقرة السابقة ، فان الشد الناتج سوف لا يكون بالضرورة متساوياً .

الشد يجب ان يصمم ليكون متساوياً عن طريق تعريف بون مكافيء l_e وجعله الاساس في كل الحسابات الخاصة به . هناك شرطان لصحة الحل أولهما ان يكون المجموع الكلي للأبوان الأفقية متساوياً ، والمجموع الكلي للاطوال المنحنية متساوياً فيما يخص الخط الفعلي والخط المكافيء .

اذا كانت هناك اجزاء عددها n فان

$$nl_e = \Sigma l \qquad [4.19]$$

وباستعمال المعادلة [4.15] نحصل على

$$n(l_e + w^2 l_e^3/24T^2) = (\Sigma l) + w^2(\Sigma l^3)/24T^2. \qquad [4.20]$$

تعويض المعادلة [4.19] في المعادلة [4.20] يعطينا

$$l_e^2 = (\Sigma l^3)/nl_e = \Sigma l^3/\Sigma l$$

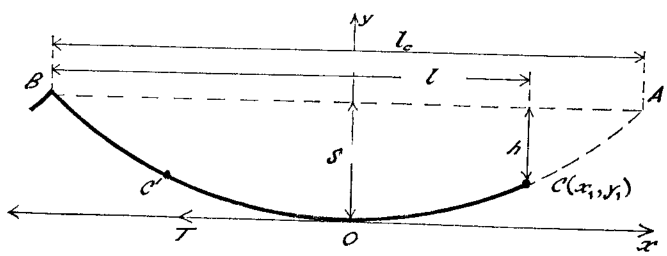
$$l_e = \{(l_a^3 + l_b^3 + \ldots)/(l_a + l_b + \ldots)\}^{\frac{1}{2}} \qquad [4.21]$$

حيث أن هذه الأجزاء هي $a, b, c \ldots$ بمعرفة l_e فان الشد T، الذي ستشيد بموجبه كل الأجزاء ، يمكن ايجاده .

4.3.3 أعمدة التثبيت عند مستويات مختلفة

SUPPORTS AT DIFFERENT LEVELS

شكل 4.4 يبين خطاً معلقا بين نقطتي تثبيت B و C تقعان بمستويين مختلفين . لتكن BOCA القطع المكافيء الـكامل حيث أن النقطتين A و B تكونان بمستوى واحد ، ويفترض ان يكون الخط الفعلي جزءاً من هذا القطع المكافيء .



شكل 4.4 أعمدة التثبت بمستويات مختلفة

افرض ان l_c = بون القطع المكافيء الـكامل (AB)

l = بون الخط الفعلي

عندئذ

$$x_1 = l - l_c/2 \qquad [4.22]$$

معادلة القطع المكافيء $y = ax^2$, يمكن ان تنطبق على BOC وعلى ; BOA لذلك فالمعادلة [4.7 أ] لاتزال تنطبق .

ومن ذلك

$$S = wl_c^2/8T. \qquad [4.23]$$

من المعادلة [4.5ب]

$$x_1^2/(S-h) = l_c^2/4S. \qquad [4.24]$$

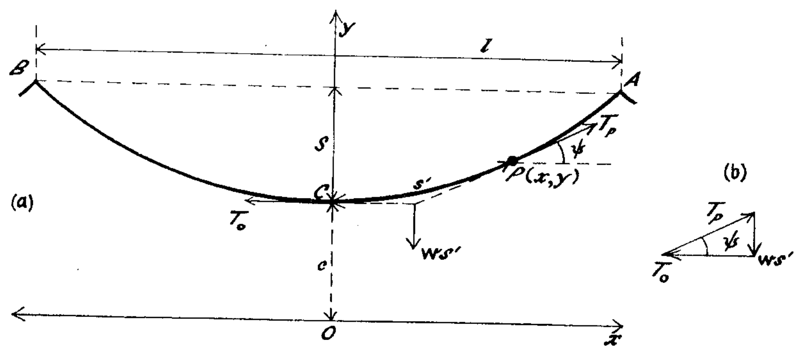
وبحذف S نحصل على

$$l_c = l + 2Th/wl. \qquad [4.25]$$

الشرح النظري أعلاه لايزال صحيحا حتى وان كان طول الخط المنحني BC اقل من BO، اي ان مستوى الارض منحدر كثيراً بحيث ان أوطأ نقطة في القطع المكافيء تقع خارج الجزء الفعلي للخط (مثلا BC′) . بمعرفة l_c ، يمكننا تطبيق ماورد في الفقرة 4.3.1 .

4.3.4 المنحني السلسلي : CATENARY

الصيغ المعتمدة على المنحني السلسلي يجب ان تستعمل لخطوط الفولتية العالية جداً اينما كان التدلي > $\frac{\text{البون}}{10}$ تقريبا . عند فك هذه الصيغ بوصفها متوالية لانهائيـــة ،



شكل 4.5 المنحني السلسلي

يمكننا تقدير الاخطاء التي تضمنها استعمال الصيغ التقريبية المعتمدة على القطـــع المكافيء .

بالاشارة الى شكل(4.5 (أ)، فالجزء CP هو في حالة توازن تحت ثلاث قوى وهي T_o الشد الافقي عند اوطأ نقطة C و T_p الشد عند P و ws' وزن الجزء العامـــل شاقولياً الى الاسفل . هذه القوى الثلاث يجب ان تلتقي عند النقطة التي تقرر خط فعل s والعلاقات بين هذه القوى يمكن ان تقرر من الشكل (4.5 (ب) . طول جزء من المنحنى السلسلي هو s' بينما الطول المناظر لجزء المنحنى السلسلي المعلق من نقطتين على مستـــوى واحد هو $s = 2s'$.

تبصر في المركبات الشاقولية والافقية

$$T_p \sin \psi = ws' = ws/2 \qquad [\text{أ}\ 4.26]$$
$$T_p \cos \psi = T_o. \qquad [\text{ب}\ 4.26]$$

من المناسب كتابة

$$T_o = wc \qquad [\text{ج}\ 4.26]$$

لذلك يمكن اعادة كتابة المعادلة [4.26ب] كما يلي

$$T_p \cos \psi = wc \qquad [\text{د}\ 4.26].$$

حيث ان c تدعى بمعلم المنحنى السلسلي . من [4.26 أ] و [4.26 د]

$$s' = c \tan \psi = s/2. \qquad [4.27]$$

الطول المنحني من المنحنى السلسلي يمكن ايجاده بالطريقة المستعملة للقطع المكافىء (الفقرة 4.3.1) وكما هو معطى بالمعادلة

$$s = c \sinh (x/c) = s/2 \qquad [\text{أ}\ 4.28]$$

والتي يمكن اعادة كتابتها ، باستعمال المعادلة [4.26 ج] وكما يلي

$$s' = (T_o/w) \sinh (wx/T_o) = s/2. \qquad [\text{ب}\ 4.28]$$

وبتعويض dy/dx بدلاً من $\tan \psi$ في [4.27] واخذ التكامل نحصل على المعادلة

$$y = c \cosh (x/c) \qquad [\text{أ}\ 4.29]$$
$$y = (T_o/w) \cosh (wx/T_o) \qquad [\text{ب}\ 4.29]$$
$$y - c = (T_o/w)\{\cosh (wx/T_o) - 1\}$$
$$= \frac{wx^2}{2T_o}\left\{1 + \left(\frac{x^2}{12}\right)\left(\frac{w}{T_o}\right)^3 + \ldots\right\}. \qquad [\text{ج}\ 4.29]$$

[4.29ج] تعطينا مقارنة بين معادلات المنحنى السلسلي والقطع المكافيء المكافئة التي لها $c = 0$. خلال أسوأ ظروف تحميل $w = F_T$ و $T_o = T_1$: وخلال ظروف التشيد . $T_o = T_2$.

من [4.28] و [4.29] نحصل على

$$y^2 = c^2 + (s')^2 = c^2 + (s/2)^2. \qquad [4.30]$$

ومن [4.26أ] , [4.26د] , [4.30]

$$T_p = wy. \qquad [4.31]$$

من [4.26ج] , [4.29] , [4.31]

$$T_p = T_o \cosh (x/c) \qquad [\text{أ}\ 4.32]$$
$$= T_o \cosh (wx/T_o). \qquad [\text{ب}\ 4.32]$$

كلما ازدادت x ، ستزداد T_P لقيمة معينة من $T_o : T_o$ هو الشد الأدنى في الخط .

تبصر الآن في المنحنى السلسلي الكامل ذي **البون** l ، وضع $X = l/2$ وبفك المتوالية اللانهائية نحصل على الصيغ التالية . طول الموصل s يكون معطى بالمعادلة

$$s = (2T_o/w)\sinh(wl/2T_o) \qquad [\text{أ}4.33]$$

$$= l\left\{1+\left(\frac{l^2}{24}\right)\left(\frac{w}{T_o}\right)^2+\left(\frac{l^4}{1920}\right)\left(\frac{w}{T_o}\right)^4+\ldots\right\}. \qquad [\text{ب}4.33]$$

والتدلي S يعطى بالمعادلة

$$S = (T_o/w)\{\cosh(wl/2T_o)-1\} \qquad [\text{أ}4.34]$$

$$= \frac{wl^2}{8T_o}\left\{1+\left(\frac{l^2}{48}\right)\left(\frac{w}{T_o}\right)^2+\ldots\right\}. \qquad [\text{ب}4.34]$$

والشد عند نقطة التثبيت A يكون

$$T_A = T_o\cosh(wl/2T_o) \qquad [\text{أ}4.35]$$

$$= T_o + wS. \qquad [\text{ب}4.35]$$

اذا أردنا أن نسحب الخط بشده بحيث يصبح خطاً مستقيماً افقياً ، فعندئذ $s' = x$ والمعادلة [14.28] تصبح

$$(s'/c) = \sinh(x/c).$$

بما أن هذه المعادلة يجب أن تكون حقيقية لكل قيم x كما أنها تكون لـ $s' = x = 0$، فعندئذ $c \to \infty$ و $w/T_o = 1/c \to 0$

يجب أن يدقق الطالب في أنه اذا كان التدلي هو $0{\cdot}1\times$ البون ،فعندئذ يكون $l/c \simeq 0{\cdot}8$: واذا كان $l = c$ فان التدلي $= 0{\cdot}1276 \times$ البون

المراجع

BRADBURY, J. et al., 'Long-term creep assessment for overhead-line conductors', 1975, *Proc. I.E.E.*, **122**, pp 1147–1151.

ELECTRICITY COMMISSION, 1937, *Electricity supply regulations.*

GRACEY, G. C. 1963. *Overhead electric power lines.* Benn, London.

GRIDLY, J. H. (Ed.) 1961. *High voltage distribution practice.* Benn, London.

MCCOMBE, J. & HAIGH, F. R. 1966. *Overhead line practice.* Macdonald, London.

WADDICOR, H. 1964. *The principles of electric power transmission.* Chapman and Hall, London.

WOOD, A. B., TAYLOR, J. V. and LIPTROT, F. J., 'Design, testing and construction of the 500-kV overhead lines for the El Chocon to Buenos Aires transmission system', 1976, *Proc. I.E.E.*, **123**, pp 51–59.

BRITISH STANDARD SPECIFICATIONS:

125. Hard-drawn Copper Conductors.
215. Part 1. Aluminium Conductors.
Part 2. Steel-cored Aluminium Conductors.
672. Hard-drawn Cadmium Copper Conductors.
1989. Memorandum on Values for the Properties of High-conductivity Copper.
3242. Aluminium Alloy Conductors.
137. Porcelain and Toughened Glass Insulators for Overhead Power Lines.
923. Impulse Voltage Testing.

مسائــــل

1. سلسلة عازل معلقة تتألف من أربع وحدات متشابهة ، السعة الذاتية لكل منها هـي اربعة أضعاف السعة بين كل مسمار رابط والأرض . اذا كان الموصل يحمل فولتيــة 76 كيلوفولت مقاسة نسبة الى الأرض ، فأوجد الفولتية عبر كل وحدة وكفاءة السلسلة .

(I.E.E.) (11, 13·8, 20, 21·2 kV, 60·8%)

2. حدد توزيع الفولتية وكفاءة السلسلة لعازل معلق ذي ثلاث وحدات اذا كانت سعــــة المسامير الرابطة الى الأرضي والى الخط هي على التوالي 15% , 5 % من السعة الذاتية لكل وحدة .

(L.C.T.) (30·2, 31·1, 38·7, 86·3%)

3. كل وحدة في سلسلة ذات ثلاث وحدات قرصية لها سعة ذاتية C والسعة من برج الى نقطة ربط المسمار والغطاء هي $0{\cdot}2\,C$. السعة من حلقة التدريج الى نقطة الربط السفلى هي $0{\cdot}4\,C$ والى نقطة الربط التي تلي السفلى هي $0{\cdot}1\,C$ ، احسب كفاءة السلسلة .

(L.C.T.) (100%)

4. السعة بين كل مسمار رابط والأرضي لسلسلة عازل معلقة ذات ثلاث وحدات هي 0·2 من سعة كل وحدة . حدد كمية الزيادة في سعة الوحدة السفلى لكي نحصل على كفاءة سلسلة مقدارها %90, علماً أن الوحدتين الاخريين بقيتا بدون تغيير .

(I.E.E.) (26·5%)

5. سلسلة عازل تحتوي على ثلاث وحدات متماثلة يمكن أن تكون لها فولتية متساوية عبر كل وحدة عن طريق اختيار سعة مناسبة بين كل نقطة مسمار وغطاء وحلقة التدريج . اذا كانت الوحدة طرف البرج لها سعة مقدارها وحدة واحدة والسعة من نقطة المسمار والغطاء الى البرج هي 0·2 من الوحدة فاحسب السعة النسبية العلوية والسفلية لنقطة المسمار والغطاء الى حلقة التدريج .

(L.C.T.) (0·4 و 0·1)

6. خط ألمنيوم ذو لب فولاذي له مساحة نحاس مكافئة مقدارها 1·15 سم٢ وله مقاومة مقدارها 0·158 اوم / كم عند 20° مئوية . اوجد موصلية النحاس المسحوب الصلد بنسبة مئوية من النحاس اللدن القياسي ذي الموصلية 100 % علماً أن الأخير له مقاومية مقدارها 1/58 اوم–ملم٢ / متر عند 20° مئوية .

(L.C.T.) (96·4 %)

7. احسب المعامل التقديري للمرونة والمعامل التقديري للتمدد الخطي لموصل ألمنيوم ذي لب فولاذي 1·15 سم٢ وقطر 7/30/0·28 cm . استعمل البيانات المعطاة لهذا الفصل .

$(18{\cdot}42 \times 10^{-6}$ per °C, $9{\cdot}18 \times 10^{10}$ N/m$^2)$ (L.C.T.)

8. موصل خط علوي معلق بوساطة برجين على طرفي ممر مائي . ارتفاع البرجين هو 29 مترو 33·6 متر على التوالي فوق مستوى الماء لهما بون افقي مقداره 336 متر . اذا كان الموصل يزن 8·33 نيوتن / متروشده يجب ان لايتجاوز $3{\cdot}34 \times 10^4$ نيوتن فاحسب (i) حيز الخلوص بين اوطا نقطة للموصل والماء (ii) المسافة الافقية لهذه النقطة من البرج الواطيء

(L.C.T.) (27·4, 113 metres)

9. خط نقل له بون مقداره متر بين عمودين بمستوى واحد وكان التدلي الشاقولي هو 6·1 متر . للموصل مساحة مقطع مقدارها 1·29 سم² ويزن 11·4 نيوتن / متر اذا كان اجهاد القطع المسموح به هو 41 400 نيوتن / سم² فاوجد عامل امان الاشتغال عندما يكون ضغط الريح بزاوية عمودية على البون هو 1195 نيوتن / م² من المساحة المعرضة .

(H.N.C.) (5·33)

10. حدد مقدار التدلي لبون طوله 183 متراً لموصل فولاذي مغلفن له 37 جديلة كل منها ذات قطر 0·259 سم . وزن الموصل هو 7·15 نيوتن / م وقوة القطع هــي 67 700 نيوتن . تحميل الريح هو 382 نيوتن / م² من المساحة المعرضة (المغطاة

بالجليد) . أفرض أن وزن الجليد هو 8920 نيوتن / م^2 والسمك العرضي للثلج هو 0·96 سم .

(جامعة لندن) (3·2 metres)

11· موصلات خط علوي معلق لها قطر 1·15 سم وذات بون 122 متر . أحسب التدلي عند منتصف – البون عندما يكون للموصلات تحميل ثلج بسمك عرضي 0·96 سم وتكون معرضة لضغط ريح أفقي مقداره 382 نيوتن / م^2 . شد الموصل المسموح به هو $3·56 \times 10^4$ نيوتن . اذا كان طول سلاسل عوازل التعليق هو 1·22 متر وحيز الخلوص الأدنى من برج التنبيت هو 0·458 م فأحسب أقل مسافة ممكنة يمكن عندها تعليق سلسلة العازل بذراعها المستعرضة . وزن الموصل هو 5·83 نيوتن / م ووزن الثلج هو 8920 نيوتن / م .

(جامعة لندن) (0·865, 1·32 metres)

12· خمن مقدار التدلي لموصل نحاسي في الهواء الساكن عند 72° فهرنهايت . بحيث أنه عند انخفاض درجة الحرارة الى 22° فهرنهايت وتحميل الريح يكون 11·2 نيوتن / م وتحميل الثلج يكون 5·27 نيوتن / م فأن الأجهاد في الموصل سوف لايتجاوز 17 200 نيوتن / سم^2 .

مساحة مقطع الموصل هي 0·628 سم^2 وزن الموصل / متر = 5·6 نيوتن . معامل يونك (E) $12·4 \times 10^6$ نيوتن / سم^2 . معامل التمدد الخطي / درجة فهرنهايت = $9·22 \times 10^{-6}$.

(H.N.C.) (2·28 m)

13· خط علوي معلق منبت على منحدر ذي ميل 1 لكل 45 . ارتفاع أعمدة التنبيت هو 7·62 متر وطول البون المقاس أفقيا هو 137 متر . اذا كانت مساحة المقطع المكافئة للموصل هي 0·893 سم^2 والأجهاد الأقصى المسموح به هو 6900 نيوتن / سم^2 فأحسب التدلي الأقصى نسبة الى عمود التنبيت الأوطأ . أفرض أن للموصل تحميل ثلج يزن 5·1 نيوتن / م وضغط الريح هو 382 نيوتن / م^2

(H.N.C.) (1·2 m)

14. موصلات الألمنيوم ذات القلب الفولاذي لخط علوي معلق لها قطر كلي 1·95 سم محمولة بوساطة سلاسل عوازل معلقة ذات طول 1·43 متر . أحسب ارتفاع اوطأ ذراع مستعرضة فوق مستوى الأرض اذا كان حيز الخلوص الأدنى بين الموصل والأرض هو 7·62 متر عندما يكون هناك حمل ثلج ذو سمك 0·96 سم وضغط ريح أفقي مقداره 382 نيوتن / م^2 وطول البون هو 244 متراً . الشد المسموح هو $3·56 \times 10^4$. نيوتن والموصل يزن 8·31 نيوتن / م ووزن الثلج هو 8920 نيوتن / م^3

(H.N.C.) (12·5 m)

الفَصلُ الخَامِسُ

قابلوات تحت الأرض

UNDERGROUND CABLES

5.1 مقدمة

القابلوات المعزولة بالورق ذات الغلاف المعدني التي تستعمل لأغلب أغراض نقل وتوزيع القدرة تحت الأرض يمكن أن تكون أما

(أ) النوع المصمت . الذي لايرفع فيه الضغط ضمن الورق المشبع بالزيت فوق الضغط الجوي . وقد يهبط الى أقل من ذلك محلياً . مثلاً في الفجوات . قد يقود هذا الى انهيار العزل عند الأجهادات الكهربائية العالية . لذلك فأن هذا النوع لايستعمل عادة لفولتيات تزيد عن 33 كيلوفولت (أي $33/\sqrt{3}$ كيلو فولت الى الأرضي) .

(ب) القابلوات المضغوطة . التي يحافظ فيها على ضغط أعلى من الضغط الجوي . أما بوساطة الغاز في القابلوات المضغوطة بالغاز أو بوساطة الزيت في القابلوات المملوءة بالزيت . تبعاً لذلك فأنه أما ان تمتليء الفجوات بالغاز عند الضغط العالي نسبياً أولاتكون هناك فجوات . في القابلوات المضغوطة التي تستعمل لفولتيات الى حد 275 كيلوفولت . يمنع تكون الفجوات باستعمال غاز ذي ضغط عال يدفع غلافاً حاجزاً رقيقاً ضد عازل اللب . التصاميم المتوفرة للقابلوات التي تملأ بالزيت هي في الخدمة حالياً في بريطانيا العظمى الى حد 275 كيلوفولت بقيم مقننة تزيد عن 700 ميكا فولت أمبير . 400 كيلوفولت و2200 أمبير. أي ان هناك قابلوات متوفرة بتبريد قسري بقدرة 3200 ميكا فولت أمبير . القابلوات المملوءة بالزيت تم تهيئتها لكي تستعمل عند 50ر كيلوفولت . وقد برز هذا النوع

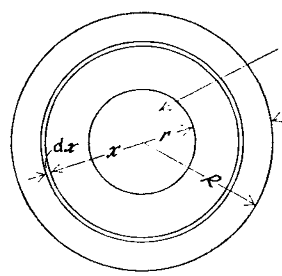
الآن بوصفه نوعاً سائداً وحل محل تلك المنظومات التي تعتمد على انضغاط الغاز ، مثل سادس فلوريد الكبريت أو النيتروجين .

أي من هذين النوعين (أ) او (ب) عند استعماله في منظومة ثلاثية الطور قد يتألف من ثلاثة قابلوات مفردة اللب أو قابلو واحد ثلاثي اللب. اذا أستعمل الأخير لفولتية أقل من 22 كيلو فولت فسيكون من النوع ذي الحزام (المبين في شكل 5.2) ، أما اذا أستعمل لفولتيات أعلى فأنه سيكون مشبكاً ، أي أن كل لب سيكون له شبكة معدنية حوله تمكنه من أستعمال فولتيات أعلى كما سنبينه فيما بعد. كل لب سيكون له كذلك غلاف منفصل من الرصاص (نوع S.L. او H.S.L.) أو من الألمنيوم (نوع S.A.).

العازل الورقي المتراكب له قوة انهيار 50 هيرتز لصفائح غير مشبعة مفردة في فحص يستمر لدقائق قليلة مقدارها حوالي 60 كيلو فولت / سم . ولكن التشبيع بخليط زيت مناسب سيرفع هذه الى حوالي 500 كيلوفولت / سم عند 50 هيرتز . رغم أن قوة الأنهيار لعازل متعدد الطبقات فعلي لقابلو مملوء بالزيت هي بدرجة 300 كيلو فولت / سم. القيم الفعلية لأجهاد التشغيل ، التي يمكن السماح بها عندما نحتاج الى عمر طويل تحت ظروف التشغيل والتي تتضمن دورات معادة من التمدد والتقلص من درجات أشتغال معينة ، تتغير من حوالي 40 كيلوفولت / سم لقابلو نوع مصمت بغلاف معدني الى مابين 100 و 150 كيلو فولت / سم لأغلب القابلوات المضغوطة المستعملة في الأيام الحالية. كل القيم أعلاه هي ج . م . ت كيلو فولت / سم .

جرت محاولات عديدة لاستعمال ورق صناعي وطبقات رقيقة صناعية بدلاً من العازل الورقي حتى عند أعلى الفولتيات . القابلوات ذات التوصيل الفائق تبدو وكأنها ستكون أرخص من القابلوات المملوءة بالزيت عند نقل أكثر من حوالي 5 كيكا فولت أمبير ولكن الحاجة لمثل هذه القيمة المقننة بعيد جداً . على الأقل في المملكة المتحدة .

بما أنه سيكون للقابلو ذي اللب المفرد غلاف معدني مؤرض فأن الفيض الكهربائي الذي سيؤخذ بنظر الأعتبار هو وحده الذي سيكون بين الموصل والغلاف . اذا كانت انصاف أقطار الموصل والغلاف هي r و R على التعاقب وكما مبينة في شكل 5.1 والشحنة على سطح الموصل هي Q كولومب / متر من الطول فأن قانون كولومب Coulomb's law يعطينا كثافة الفيض الكهربائي عند نصف قطر مقداره x متر $(r<x<R)$ وكما يلي



شكل 5.1 مقطع لقابلو ذي لب – مفرد

$$D_x = \frac{Q}{2\pi x} \text{ coulomb/m}^2$$

والمجال الكهربائي او تدرج الجهد عند نصف القطر هذا سيكون

$$E_x = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o\epsilon_r x} \text{ V/m} \qquad [5.1]$$

حيث أن ϵ_r هي السماحية النسبية لعازل القابلو و $\epsilon_o = 8{\cdot}85 \times 10^{-12}$ F/m

Q و D و E و V هي كلها قيم جـ. م. ت. الكميات المتغيرة جيبياً مع الزمن . الأحرف الطباعية المائلة أستعملت هناك لـ V و Q لأن مايهمنا عند هذه النقطة هو مقدارهما وليس طورهما. D و E بينت هنا بالأحرف المائلة رغم أنهما لا يتغيران مع الزمن فقط. ولكن في الفضاء أيضاً .

فرق الجهد V بين اللب والغلاف يمكن أن يعطى كمايلي

$$V = \int_r^R E_x \, dx$$

$$V = \frac{Q}{2\pi\epsilon_o\epsilon_r} \log_e \frac{R}{r} \text{ volts} \qquad [5.2]$$

والسعة بين اللب والغلاف تكون

$$C = \frac{2\pi\epsilon_o\epsilon_r}{\log_e (R/r)} \text{ F/m.} \qquad [5.3]$$

المعادلة [5.3] تطبق كذلك على أغلب القابلوات الثلاثية اللب التي تستعمل لفولتيات أكثر من 11 كيلو فولت لأن لهذه القابلوات مشبكات معدنية مؤرضة تحيط بكل لب أو لها غلاف منفصل لكل لب وأما أن يكون لها كلاهما . عندما لايكون مقطع الموصل دائرياً . كأن يكون بيضوياً مثلاً . فأن نصف القطر r المستعمل في المعادلة [5.3] يمكن أن يؤخذ على أنه محيط الموصل الفعلي مقسوماً على 2π . التعويض عن Q في [5.1] من [5.2] يعطينا تدرج الفولتية عند نصف قطر x وكمايلي.

$$E_x = \frac{V}{x \log_e (R/r)} \text{ V/m.} \qquad [5.4]$$

الأجهاد الكهربائي الأعظم في عازل القابلو والمبين بالمعادلة [5.4] سيحدث عند سطح الموصل ويمكن أن يعطى بالمعادلة التالية :

$$E_r = \frac{V}{r \log_e (R/r)}$$

وستزداد بمقدار حوالي 15 الى 25 % فوق هذه القيمة بسبب جدل الموصل (مالم يوضع على سطح الموصل مشبك ناعم موصل) .
بمساواة dE_r/dr صفراً تعطينا الاجهاد الأدنى عند سطح الموصل بوصفه V/r عندما يكون $\text{Log}_e R/r = 1$. أي أنه عند $R = 2{\cdot}718\, r$. ان تطبيق هذه النتيجة محدود

ولـكنها تشير الى أن لقيمة معلولة لـ V و R سيكون هناك حد الى كم يجب أن يكون حجم الموصل ، خصوصا عند الفولتيات العالية .

بما أن العازل يمكن أن يجهد الى حدود تدرج فولتية الأشتغال عند سطح الموصل فانه سيكون أقل اجهاداً كلما أبتعدنا من الموصل ، مما يستدعي النظر محاولة تقليل كمية العازل عن طريق اعادة توزيع الأجهاد بحيث أنه يزيد في الطبقات الخارجية بدون أية زيادة عند الموصل . هناك طريقتان لعمل ذلك :

(أ) تدرج السعة : باستعمال مادتين عازلتين أو أكثر وتكون التي لها سماحية أكبر أقرب الى الموصل (أنظر [*5.1*]) ؛

(ب) تدرج الأغلفة الداخلية : بتقسيم المادة العازلة المفردة الى طبقتين أو أكثـر باستعمال أغلفة داخلية معدنية رقيقة محملة بالجهد المناسب عن طريق ربطها الى تفريعات على ملفات المحول المغذي للقابلو .

بما أن كلتا الطريقتين غير مستعملتين عملياً فسوف لا نناقشهما أكثر من ذلك ولـكن هناك بعض الأمثلة حولهما تم ادراجها في نهاية الفصل على أنها تمرينات في المبادىء المعنية . من جهة اخرى فان استعمال ورق خفيف قرب الموصل سيزيد من المتانة الـكهربائية في هذه المنطقة لأنه يقلل « الفجوات التناكبية » .

مثال *5.1* قابلو ثلاثي اللب طوله 6·43 كم وكل لب مغلف بصورة منفصلة . قطر كل موصل هو 2·5 سم والثخن العرضي لعازله هو 0·5 سم . العازل له سماحية نسبية مقدارها 3·2 . احسب الأجهاد الأقصى في العازل و kVA الشحن عند ربط القابلو الى مصدر ثلاثي الطور 50 هيرتز 33 كيلو فولت .

الحـــل :

الاجهاد الاقصى يحدث عند سطح كل موصل ويكون كما هو معطى بالمعادلـــة $E_r = V/(r \log_e R/r)$ حيث أن V هي الفولتية بين كل لب وشبكته المؤرضة أي أن V هي فولتية الطور للمنظومة $= 33\,000/\sqrt{3}$ فولت . $r = 1{\cdot}25$ cm و $R = 1{\cdot}25+0{\cdot}5$ cm .

$$E_r = \frac{33\,000}{\sqrt{3} \times 1{\cdot}25 \log_e (1{\cdot}75/1{\cdot}25)} = 45{\cdot}4 \text{ kV/cm.}$$

السعة / متر لكل لب

$$= 2\pi\epsilon_o\epsilon_r/(\log_e R/r) \text{ F}$$
$$= \frac{2\pi \times 8{\cdot}85 \times 10^{-12} \times 3{\cdot}2}{\log_e (1{\cdot}75/1{\cdot}25)} \text{F}$$
$$= 5{\cdot}31 \times 10^{-4}\ \mu\text{F.}$$

والسعة الكلية لكل اللب

$$= 5{\cdot}31 \times 10^{-4} \times 6{\cdot}43 \times 10^3\ \mu\text{F}$$
$$= 3{\cdot}41\ \mu\text{F.}$$

وتيار الشحن الجاري في كل لب سيكون تبعاً لذلك

$$I = 2\pi \times 50 \times 3{\cdot}41 \times 10^{-6} \times 33\,000/\sqrt{3} = 20{\cdot}4 \text{ A.}$$

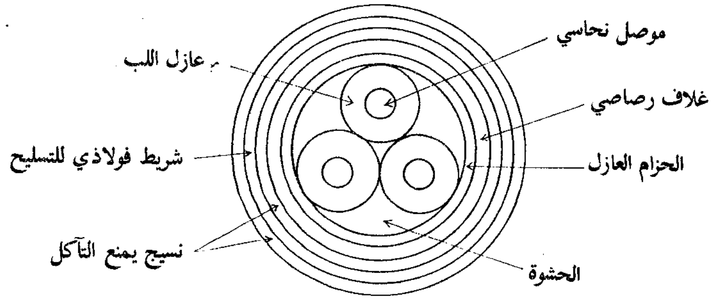
و kVA الشحن الكلية لكل الألباب الثلاثة هي

$$= 3VI \times 10^{-3} = \sqrt{(3)} \times 33\,000 \times 20{\cdot}4 \times 10^{-3}$$
$$= 1168\ kVA.$$

5.3 سعة القابلو المحزوم الثلاثي اللب

Capacitance of 3-core Belted Cable

تشكيلة القابلو النوع المصمت هذا تستعمل الى حد حوالي 11 كيلو فولت وكما نوقشت مؤخراً . في الشكل 5.2 كل موصل يكون ملفوفاً بالورق والفراغات تملأ بعد ذلك لتكون المقطع الدائري الكلي اضافة الى حزام من العازل الورقي المحيط بالألباب الثلاثة .



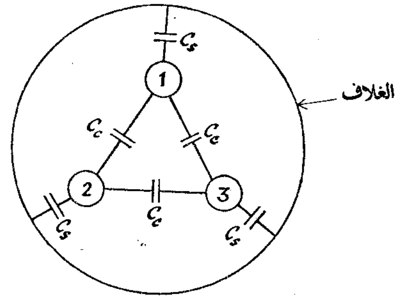
شكل 5.2 مقطع لقابلو ثلاثي اللب محزوم .

نحتاج هذا الحزام العازل لأنه اذا كانت الفولتية بين الألباب هي V_L فان عازل اللب سيكفي فقط الى $V_L/2$ بينما تكون الفولتية بين كل لب والأرضي $V_L/\sqrt{3}$

بما أن مقطع الموصل غالبا مايكون غير دائري والموصلات لاتكون محاطة بعازل متجانس موحد الخواص ذي سماحية معلومة واحدة فان السعات C_c بين الألباب و C_s بين اللب والغلاف ليس من السهولة حسابها ونحصل عليها بصورة عامة بالقياس . المتسعات المؤثرة التي تمثل هذه السعات / مترمبينة في شكل 5.3 . المتسعات المربوطة مثلثياً C_c يمكن ابدالها بثلاثة متسعات كل منها $3C_c$ مربوطة نجمياً (انظر الملحق 2) . السعة المؤثرة لكل لب الى المحايد المؤرض هي ($C = (C_s+3C_c)$.

هناك قياسان شائعان لتحديد سعات هذا النوع من القابلو وهما :

(أ) السعة C_a بين الموصل 1 والموصلين الآخرين كل منهما مربوط الى الغلاف ، حيث أن $C_a = C_s+2C_c$.



شكل 5.3 السعات بين الألباب والغلاف لقابلو ثلاثي اللب محزوم

(ب) السعة C_b بيـن الغـلاف وكـل الموصلات مربوطـة بعضهـا ببعض ، حيث أن $C_b = 3C_s$ من هذه القيم فان السعة الى محايد المؤثرة ستكون

$$C = \frac{9C_a - C_b}{6} \qquad [5.5]$$

5.4 القابلوات الثلاثية اللب 3-core Cables

5.4.1 القابلوات النوع المصمت SOLID-TYPE CABLES

هذه القابلوات تشبع اجمالياً بصورة رئيسية ، أي أن العازل يجفف ويشبع بالزيت بعد أن يكون الورق قد لفَّ حول الموصلات . في قابلو محزوم ثلاثـي اللب يتغير المجال الـكهربائـي من لحظة الى أخرى فهو في الحقيقة يدور عند سرعة ثابتة . والاجهادات، تكون عالية بصورة خاصة عند سطح الموصل والذي يكون في تلك اللحظة عند أعلى جهد ، عند النقاط القريبة الى الموصلات الأخرى ، والى الغلاف والى مركز القابلو . هـــذه الاجهادات تكون عرضية بصورة رئيسية ويمكن أن تستبقـى عند قيم يمكن للعازل الورقـي أن يقاومها اذا كانت عمودية على سطحه . من ناحية أخرى فقد حدثت عدة اخفاقات عندما استعملت هذه القابلوات عند 33 كيلو فولت ووجد أن ذلك كـان بصورة رئيسية في مادة الحشوة في مركز القابلو أو قربها . وبصورة خاصة عند التقـاء عازل الموصل بالحشوة . يكون للمجال الكهربائي في هذه المناطق مركبة معتبرة مماسة الى سطح الورق . والمتانة الـكهربائية للورق تكون أقل على طول اتجاه الألياف مـــن الاتجاه العمودي عليها . علاوة على ذلك فان احتمال تكون الفجوات يكون أكثر في حدود مادة الحشوة أو عندها . وتأين الغاز في هذه الفجوات يمكن أن يؤدي الى الانهيار ، كما سيناقش فيما بعد .

مشكلة توسيع القابلوات الى فولتيات أعلى من 33 كيلو فولت تم حلها جزئيـاً باستعمال (تبعاً للعمل الذي قام به Höchstädter.) مشبك معدنـي مؤرضــ حول عازل كل موصل . هذا المشبك يمكن أن يتالف من رقيقة معدنية مثقبة . أو شريط مع مجال بين اللفات . بحيث أن زيت التشبيع أو الغاز يمكن أن يمر من خلاله بحرية . في هذه الحالة أو في القابلو ذي الغلاف المؤرض الذي له كذلك مشبك مستقل .

سوف لايكون هناك حزام عازل . وكل لب سيكون له عازل الى الارضـي والمجـال الـكهربائـي فيه يكون بالواقع كله مركزي . باستعمال المشبكات يمكننا استعمال عدد من القابلوات النوع المصمت أحادية اللب لفولتية 66 كيلو فولت . ولـكن تطويـر انواع متعددة من القابلوات المضغوطة لسد الحاجة الى قابلوات أعلى من 33 كيلوفولت . جعل استعمال القابلوات من النوع المصمت لأعلى من هذه الفولتية غير أقتصادي بسبب ثمن العازل الـكبير الذي سنحتاجه .

للقابلو النوع المصمت 33 كيلو فولت ثخن عازل عرضـي يقارب 0.75 سم (هذا سيصبح أقل بقليل كلما ازداد حجم الموصل) . وهذا يعطينا اجهادا عند سطح الموصل يقارب 40 kV/cm . الشدة الدفعية لمثل هذا العازل هي حوالـي 1000 kV/cm . بحيث أن فولتية الأنهيار الدفعية للقابلو تزيد كثيرا عن فحص فولتية الصمد الدفعية لقابلو 33 كيلوفولت . والتـي تكون 194 kV/ cm . وثخن العازل سيكون محكوما باداء تردد القدرة .

5.4.2 القابلوات المملوءة بالزيت OIL-FILLED CABLES

في هذه القابلوات يحافظ على زيت ذي لزوجة واطئة عند ضغط كاف لمنـع تكون الفجوات . عن طريق ربط القنوات ضمن القابلو الى خزانات زيت . تكـون القناة في القابلوات أحادية اللبُ بلف جدائل الموصل على إنبوب ذي شريط فولاذي حلزونـي . أو عن طريق تركيب قطاعـي مثبت ذاتيا . أما في القابلوات الثلاثية اللب فتكوَن ثلاث قنوات . واحدة في كل مجال حشوة . باستعمال حلزون فولاذي أو ألمنيوم. وبدلا من ذلك . عند استعمال أغلفة من الألمنيوم . يمكن رفع الحشوة من المجال فيما بين الألباب وعندئذ يكـون هـذا المجال مهيأ لجريان الزيت دون الحاجة الـى قنوات حلزونية منفصلة . المنظومة يجب ان تمنع هبوط الضغط في القابلو الى أقـل مـن الضغط الجوي لذلك ينظم المقياس بحيث يكـون الحد الأدنـى حوالـي $21.7\ kN\ m^2$. يجب أن تصمم المنظومة لـكـي تمنع الضغوط العابرة . الناشئـة عن زيادة مفاجئـة في الحمل . من عبور الحد الذي هو حوالـي $8.63 \cdot 10^5\ N\ m^2$ في المقياس . تمدد الزيت يمكن أن يحصل بكبس الصناديق المرنة الحاوية على غاز ضمن الخزانات. اجهاد بداية التفريغ يكون حوالـي 300 الى 400 كيلوفولت سم والذي هو أكثر

بكثير من ذلك للقابلو النوع المصمت بحيث ان اجهادات التشغيل الاعتيادية تكون قد ارتفعت بصورة محسوسة جداً . وهكذا فقابلو 132 كيلوفولت ذو اجهاد اشتغال اعتيادي على الموصل مقداره 110 كيلو فولت / سم سيحتاج الى سمك عرضـي من العازل بحدود 1 سم فقط ، ولـكن بما أن الأنضغاط والتخلص من الفجوات سيسبب زيادة قليلة أو لايسبب في الشدة الدفعية ، فان هذا السمك سيكون محكوماً الى حد كبيـر باحتياجات الأنهيار الدفعـي . بما أن تكون الفجوات سيمنع الى حد كبير فان درجـة حرارة الموصل القصوى الاعتيادية يمكن أن تزيد عن تلك للقابلو النوع المصمت ، وتكون في بريطانيا 85°C . لقد ازداد الان استعمال هذه القابلوات كثيـراً عنـد 33 كيلو فولت كما ازداد ايضاً في الفولتيات الأعلى .

5.4.3 القابلوات المضغوطة بالغاز GAS-PRESSURE CABLES

الأنواع الثلاثة الرئيسة هي المملوء بالغاز ، والمضغوط المشبع (نادر الاستعمال حالياً) وقابلوات الانضغاط .

في القابلوات المملوءه بالغاز يكون العازل الورقـي مشبعاً بهلام نفطـي قبل لفـه على الموصلات بحيث لايكون لها مركب حر . الفراغات البينية بين طبقات الورق تملأ بعد ذلك بالغاز والذي يكون نايتروجين جافاً عادة عند ضغط الى حد $1{\cdot}38 \times 10^6$ N/m² مكونـاً عـازلاً مركباً . يجري الغاز على طول جدائل القابلو عبر فضاءات الحشوة ، أو عبر الفجوات التناكبية في العازل وجدائل الموصل ، او عن طريق ترك حيز صغير الى الغلاف في حالة القابلو المفرد اللب .

القابلوات المضغوطة المشبعة التـي لاتستعمل الان مالم تطلب بالتخصيص لاجراء تحويرات في الانظمة الموجودة ، لها أنبوب رصاصـي في فضاء الحشوة لتسهيـل جريان الغاز الى العازل المشبع اجمالياً . مركب التشبيع المستعمل يكون مناسباً لاجهادات كهربائية عالية وله فقدان عازل قليل مع تغير قليل نسبياً في عامل القدرة مع درجات الحرارة .

كلا القابلوين الزيتي والغازي لهما أشكال متغايرة من هذه الأنواع . ويشمل ذلك تلك الأنواع ذات الزيت والغاز على التوالي عند ضغط يقارب 10^6 N/m² · 1.83−1.72

ضمن انبوب فولاذي . في النوع السابق أي قابلو نوع زيت مضغوط في انبوب . سيتخلل الزيت عازل الألباب المشبكة الثلاثة . بينما في قابلو نوع انضغاط غاز في انبوب والذي يستعمل الى حد 275 كيلو فولت . سيؤثر الضغط على أغلفة من رصاص غشائي رقيق لالباب القابلو من النوع المصمت الثلاثي لكي يمنع تكون الفجوات . قابلو الأنضغاط رغم أنه يستعمل لفولتية 275 كيلو فولت الا أن استعماله محدود بقدرةمقننة تقارب 400 ميكا فولت أمبير . بسبب الحرارة المشتركة للالباب الثلاثة في انبوب واحد . اذا استعملنا بدلا من ذلك قابلوا كاملا بذاته يكون لكل لب فيه غلاف خارجي معزز لكي يحتوي ضغط الغاز . فسيكون هناك تحديد في حجم القابلو بسبب الكلفة .

5.5 المفاعلة الحثية لموصل Conductor Inductive Reactance

المعادلتان [2.9] و [2.23] على التوالي . في الفصل 2 . يمكن جعلهما أساسا لحساب محاثة القابلوات الأحادية والثلاثية اللب على ان تطبق فعليا على كل موصل . هذه المعادلات يمكن تحويرها اذا كان ذلك ضروريا لكي تشمل المؤثرات التالية : −

(أ) نقص في المحاثة بسبب التقارن المشترك مع الغلاف . هذا التاثير يكون قليلا بصورة عامة عدا حالات معينة مثل القابلوات الاحادية اللب الكبيرة ذات الغلاف الألمنيومي .

(ب) زيادة في المحاثة بسبب التقارن المشترك مع التسليح للقابلوات الثلاثية اللب . هذه الزيادة يمكن ان تكون الى حد 10 % او 20 % . 2 %

(ج) نقص في المحاثة بسبب قلة المباعدة الفعلية بين القابلوات التي لها موصلات ذات مقاطع مشكلة بالمقارنة مع الموصلات الدائرية المناظرة .

اذا طبقنا المعادلة [2.23] على قابلو محزوم ثلاثي اللب ذي موصلات 0.238 /37 سم مع عازل موصل بسمك 0.444 سم فيمكننا ان نجد D_m و r_m كما يلي . الموصل ذو 37 جديلة له جديلة في المركز محاطة بثلاث طبقات تحتوي على 6 . 12 و 18 جديلة

على التوالي بحيث يكون نصف قطر الموصل الكلي مساويا لـ $0{\cdot}834$ cm $3{\cdot}5 \times 0{\cdot}238$ cm
وبذلك ستكون r_m $0{\cdot}643$ cm $= 0{\cdot}778 \times 0{\cdot}834$. وتكون المسافة بين مراكز الموصلات منتظمة ولذلك فان $D_m = 2(0{\cdot}444 + 0{\cdot}834) = 2{\cdot}54$ cm
بناء على ذلك ستكون محاثة كل موصل هي

$$\frac{\mu_o}{2\pi} \log_e \frac{D_m}{r_m} = 2 \times 10^{-7} \log_e \frac{2{\cdot}54}{0{\cdot}643} \text{ H/m}$$

قبل ان نأخذ بنظر الاعتبار العوامل المذكورة في (أ) و (ب) و (ج) اعلاه . عندما تتألف الدائرة الثلاثية الطور من ثلاثة قابلوات أحادية اللب فيمكننا مرة اخرى استعمال [2.23] وبالنسبة لقابلوين مماثلين في دائرة احادية الطور يمكن ان نطبق المعادلة [2.29] .

5.6 مقاومة الموصل المؤثرة Effective Conductor Resistance

عند حساب المقاومة المؤثرة R_{eff} لكل موصل في قابلو فيجب ان نأخذ في الحساب العوامل الخمسة التالية : مقاومة الـ d.c عند درجة حرارة الاشتغال . التأثير القشري . التأثير التقاربي . مفاقيد الغلاف . مفاقيد التسليح . وسنشرح كل واحدة منها على التعاقب .

مقاومة الـ $D.C.$. درجة حرارة الموصل القصوى يجب ان تثبت بعد اخذ العوامل التالية بنظر الاعتبار : فقدان الشدة الكهربائية والميكانيكية للورق وللسائل المشبع . وتمدد الموصل والغلاف . واحتمال تكون الفجوات بسبب التمددات المتفاوتة . وطريقة مد القابلو . فيما يخص القابلوات المضغوطة يجب ان لاتتعدى درجة حرارة الموصل 85 مئوية أما الانواع الاخرى من القابلوات . فان درجات الحرارة ستحدد بين 50 مئوية و 80 مئوية . لذلك فان مقاومة الـ d.c لموصل نحاسي عند درجة الحرارة القصوى قد تتجاوز قيمتها عند 20 مئوية بحوالي 12 الى 26%

التأثير القشري : زيادة المقاومة بسبب التأثير القشري عند تردد محدد تعتمد على مساحة المقطع وبمدى اقل على درجة الحرارة . لموصلات ذات مقطع 3 سم² و 6 سم² و 12 سم² . فان الزيادة عند 50 هيرتز ستكون حوالي 2 % و 7 % و 24 % على التوالي . لذلك

فانها ستكون مهمة لأزيد من حوالي 6 سم². يجب استعمال تركيب خاص عندما تكون المساحة اكثر من 9 سم² لتقليل هذا التأثير. وعند ذلك ستكون الزيادة في المقاومة لمقطع 12 سم² هي حوالي 6 ٪ .

التأثير التقاربـي : هذه الزيادة في المقاومة ستكون نتيجة لعدم انتظام كثافة التيار على مقطع الموصل بسبب الفيض المغناطيسي للتيار في موصلات الاطوار الاخرى. ولحجم معين ستكون الزيادة في القابلوات الاحادية اللب اكثر منها للقابلوات. الثلاثية اللب المحزومة. فيما يخص الاخير يكون مقدار الزيادة بصورة عامة مقاربا للزيادة التي تكون بسبب التأثير القشري. عند زيادة مقاومة الـ d.c. عند درجة حرارة الاشتغال بعوامل التأثير القشري

الثلاثة متقاربة كانت المفاقيد أقل. لانه لو أهملنا المشبكات او اغلفة الـ S.L فــــان المفاقيد الدوامة في الغلاف الخارجي ستنشأ من الفيض المغناطيسي الدوار والذي سيكون صفرا فيما لو كانت الالباب الثلاثة في المواضع أنفسها في الفضاء بالضبط.

اذا لم تكن الاغلفة لثلاثة قابلوات احادية اللب مربوطة كهربائيا سوية فان الحث بين الموصلات والاغلفة سيولد فولتيات بين غلاف وآخر وهذه ستعتمد على المباعـــدة ولـكنها قد تصل في بعض الاحيان الى 100 فولت كم لـكل 1000 امبير جار في الالباب. لـكي نتجنب هذه الفولتية غالبا ماتربط الاغلفة سوية. اذا ماتم ذلك عند كلتا النهايتين فان التيارات ستدور بين الاغلفة. مع ان ذلك سيولد بعض المفاقيد. وستنزع الى الغاء الفقد بسبب التيارات الجارية ضمن الغلاف الواحد التي اجملت اعلاه. ستكون الفولتية. وبذلك الفقد. أكبر كلما كانت الالباب متباعدة اكثر عن بعضها. لقد تم ايجاد طـرق ترابط عرضي عند نقاط الربط أمكن بوساطتها ازالة مفاقيد الغلاف بسبب التيارات الـدوارة. بصورة فعلية وفولتيات الاغلفة الداخلية بقيت قليلة. وهذا سيكون ضروريا عندما تكون المباعدة بين الالباب كبيرة. فيما يخص القابلوات ذات 275 كيلوفولت وذات مقطع 6 الى 20 سم² والمسافة بين مراكزها كانت 18 سم . يكون الفقد الدوار للغلاف مساويا لفقد الموصل ولذلك سيكون من الضروري جدا عمل ترابط عرضي او اي بديل اخر. اذا كان نقل القدرة من طور الى اخر. ومحصلة هبوط الفولتية اللامتوازن بسبب مد ثلاثة قابلوات أحادية اللب في المستوى نفسه. كبيرا جدا فيجب عند ذلك تبديـــل موضعهما .

مفاقيد التسليح : مفاقيد التيارات الدوامة والتخلفية في التسليح الفولاذي قد تتعدى المفاقيد في الغلاف الرصاصي وقد تصل الي مايقارب 20 % لبعض القابلوات الثلاثية اللب . التسليح الفولاذي يكون غير مقبول بصورة عامة في القابلوات الاحادية اللب بسبب المفاقيد الكبيرة التي ستحدث .

5.7 الأنهيار Breakdown

رغم ان تشبيع الصفائح المنفصلة للعازل الورقي لقابلوما يرفع اجهاد الانهيار عند التردد الاسمي 50 هيرتز عند سطح الموصل الى حوالى 500 كيلوفولت / سم اذا سلطت الفولتية لدقائق قليلة . (وستكون 2000 كيلوفولت سم لفحص دفعي 1/50 مايكروثانية) فان الانهيار سيحدث عند اقل من 200 كيلوفولت سم اذا أبقينا الفولتية ذات 50 هيرتز لأيام قليلة . فولتية الانهيار خلال فحص زمن قصير ليست هي الدليل الذي يمكن الاعتماد عليه مقارنة بفولتية الانهيار التي ستحدث بعد زمن طويل . فمثلا القابلو الذي له قيمة ابتدائية عالية يمكن ان تكون له قيمة زمن – طويل واطئة . يتأثر الانهيار بصورة خاصة بالظروف في الفجوات التناكبية بين شرائط الورق حيث تحدث تركيزات الاجهاد .

الانهيار في عازل القابلو يمكن ان يحدث بسبب :

(أ) خرق . اي ثقب نظيف خلال العازل . يحدث ذلك عادة في الفحص المختبري لعينة من عازل عند رفع الفولتية بسرعة . ولكنها نادرة الحدوث أثناء الخدمة .
(ب) اللااستقرارية الحرارية .

(ج) التنبه

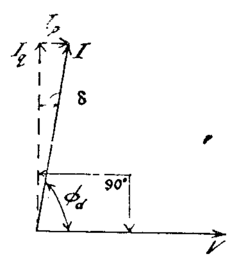
العمليتان الأخيرتان سببتا بعض الأخفاقات في الخدمة في السابق . ولكنها يجب ان لاتحدث اذا لم نتجاوز حدود درجات حرارة معينة . والاخفاقات في القابلوات المضغوطة الحدثة بسبب هذه العمليات الآلية الكهربائية . والتي سنناقشها الآن باختصار . نادرا ماتحدث . مرقع الاعطال في القابلوات وبعض أسبابها مشروحة في كتاب Gooding (1966) .

تيار الشحن لقابلو . وكما مبين في شكل 5.4 . سيتقدم على الفولتية المسلطة بزاوية مقدارها ϕ_d والتي ستكون أقل من 90° بقليل . بسبب فقد القدرة القليل جداً الناشيء من تيار التوصيل بصورة جزئية . لأن المقاومة الأجمالية ومقاومة التسرب السطحي ليستا لانهائيتين . مقاومه العازل الأجمالية يمكن أن نجدها بالتشبيه مع المعادلة [5.3] وتكون كما يلي

$$\frac{\rho \log_e (R/r)}{2\pi l} \text{ ohms} \qquad [5.6]$$

لطول مقداره l متر حيث أن ρ هي مقاومية العازل . عند تسليط فولتية ج . م . ت متناوبة طور الى محايد V عبر السعة المؤثرة C (المعطاة بالمعادلة [5.3]) فان فقد القـــدرة $\simeq$ $\omega CV^2 \cos \phi_d$ وهذه ستتعدى تلك لفولتية مسلطة مستمرة . فقد القدرة المتزايد يحدث في اجمالي العازل بسبب تخلفية العازل . وهي بصورة عامة أكثر بكثير من الفقد التسربي .

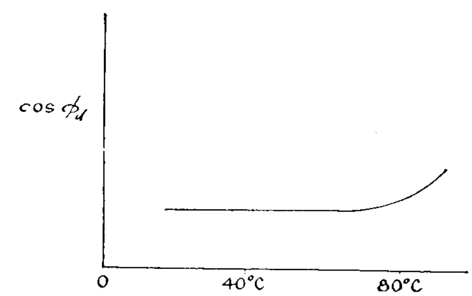
جتا $\phi_d =$ جا $\delta \simeq$ ظا $\delta \simeq \delta$ (أنصاف قطرية) . لأن ($90 - \phi_d$) $= \delta$ و



شكل 5.4 مخطط طوري لعازل قابلو

$\delta < 0{\cdot}5^\circ$ لأغلب القابلوات . جتا ϕ_d يجب أن يبقى صغيراً جداً تحت كل ظروف الأشتغال . لأنه اذا كان كبيراً . سيسبب فقداً كبيراً في القدرة . وسترتفع درجة حرارة العازل T بصورة محسوسة . اذا كان على القابلو أن يشتغل تحت ظروف يكون فيهـــا $\partial(\cos \phi_d)/\partial T$ كبيراً بدرجة كافية (انظر الشكل 5.5) . فان درجة الحرارة يمكن أن تستمر في الزيادة الى أن يتلف العازل . يحدث ذلك لأن زيادة درجة الحرارة تسبب

زيادة في القدرة المبددة في العازل .والتي ستؤدي مرة اخرى الى ارتفاع اضافي في درجة الحرارة . وهذا التأثير سيكون تراكميا مالم يكن معدل تبديد الحرارة مساويا لمعدل توليدها أو يفوقه . عوازل القابلوات الحديثة لها عامل قدرة واطيء الى حد بحيث أن اللاأستقرارية الحرارية لن تحدث تحت ظروف الأشتغال . ولكن ربما بعد بدء عملية التتبع . في حين أنه مع اللاأستقرارية الحرارية سوف لايحدث تلف دائمي اذا تم وقف ارتفاع درجة الحرارة قبل الوصول الى القيمة القصوى المحددة . أما اذا قاد التأين الى تكوين لب كاربوني فالراجح أن تستمر العمليات الآلية التالية حتى يحدث الأنهيار . وقد يحدث ذلك بعد زمن طويل جداً .

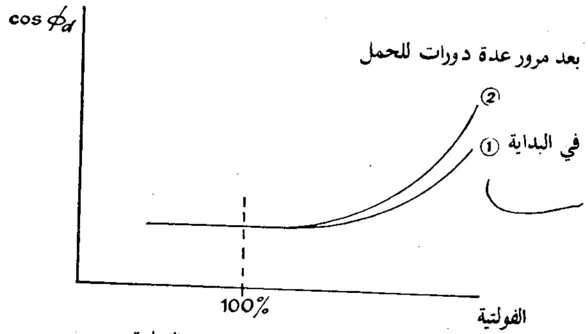


شكل 5.5 تغير جتا ϕd مع درجة الحرارة

5.7.2 التتبع التالي لتأين الفجوة

TRACKING FOLLOWING VOID IONISATION

عندما حدثت اخفاقات العوازل التي في العمل . مثلاً في قابلوات النوع المصمت التي استعملت مبكراً لفولتية 33 كيلوفولت . كانت في أغلب الأحيان بسبب التتبع الكاربوني المبتديء من سطح الموصل حيث يكون الأجهاد في أعلاه والممتد بالتدريج نحو الخارج . بشكل حرق شجرة على سطح الأشرطة الورقية . الى أن حصل الأنهيار . ابتدأ ذلك عن طريق حدوث تأين في الهواء أو الغاز . الذي قد يكون أقل من الضغط الجوي . في الفجوات التي يمكن أن تتكون بين طبقات الورق ربما خلال دورة الحمل أو بسبب تصريف المركب . الزاوية ϕ_a لاتتغير بصورة محسوسة مع ازدياد الفولتية حتى تكون الاجهادات بدرجة تكفي لبدء حدوث التأين . بعدها سيزداد جتا ϕ بصورة ملحوظة كما مبين في المنحنى (1) لشكل 5.6 . وفي شكل 5.5 . عندما تكون الفولتية



شكل 5.6. تغير $\cos \phi_d$ مع الفولتية

اذا ϕ_a في ازدياد قليل هناك سيكون ت القابلوا من العديد في . 100% من أكثر المسلطة زاد ت الفولتية الى حد 200 % . عند تغيير الحمل على القابلو سيحصل تمدد للمركب العازل أثناء ارتفاع درجة الحرارة . والذي قد يسبب تصخماً بسيطاً في الغلاف وبما ان هذا التشويه سيبقى بعد تقلص المركب . فانه من الممكن أن تتكون فجوات في العازل . بعد دورات حمـل متكررة . من الممكن أن يزداد عامل القدرة تبعاً ذلك (انظر المنحنى (2) في شكل 5.6) . اذا سمحنا لدرجة الحرارة بالأزدياد بحيث تتجاوز حداً معيناً . وتحت ظروف اشتغال اعتيادية فان جتا ϕ_a سوف لايتغير كثيراً سواء مع درجة الحرارة أو مع الفولتية . ومن المرجح أن يكون أقل من 0.005 .

المشكلات المتضمنة في اقرار درجات الحرارة القصوى المسموح بها التي يمكن أن نسمح بها لأشتغال اعتيادي مستمرٌ عند التيار المقنن الكامل . لكميات موصوفة . والتردد وفترة التحميل الأضطراري خلال الفترة الى حين ازالة الأعطال هي بالطبع معقدة جداً وتشتمل على عوامل أكثر بكثير من الأعتبارات البسيطة التي يمكن أن توحيها اللااستقرارية الحرارية والتتبع المشروحان في أعلاه . فمثلاً تحت ظروف دائرة قصيرة يكون الأرتفاع في درجة الحرارة المسموح به محدداً باعتبارات ميكانيكية . مثل احديداب نقاط الربط بسبب تمدد الموصل . اضعاف حلقات نقاط الربط بسبب لحام حرارة مفرطة . تشقق الأغلفة الرصاصية . تفجر الحزام العازل عن طريق القوى الكهرومغناطيسية . ظروف التحميل المستمر ودرجات الحرارة الناتجة عنها يجب أن توضع بحيث أن التقادم في الورق لايقود الى الاخفاق في خواصه الميكانيكية . تقليل °10 مئوية في درجة حرارة التقادم تزيد الزمن اللازم للوصول الى التلف نفسه بعامل مقداره 2 الى 2.5 . درجة

الحرارة القصوى المسموح بها لموصل تعتمد على طريقة مد القابلو ليس بسبب تغير طريقة تبديد الحرارة فقط ولكن لأنه اذا ترك القابلو حراً ليتمدد أو يتقلص في قناة فان هناك احتمالا أكبر للتلف الميكانيكي للورق كما ستكون حركة الغلاف أكبر مما لو دفن القابلو مباشرة في الأرض . فلو أخذنا مثلا درجة حرارة الموصل القصوى لقابلو 33 كيلو فولت النوع المصمت في بريطانيا . والذي سيكون محدداً بتجنب تكون الفجوات بدلاً من تلف مواد العازل . فانها ستقل من 65° مئوية لقابلوات مدفونة مباشرة في الأرض الى 50° مئوية لقابلوات عادية مغطاة بالرصاص موضوعة في قنوات وذلك بسبب حركة الغلاف الرصاصي . في حالة القابلو المسلح يحافظ على درجة حرارة الموصل في القنوات عند 65° مئوية لأن التسليح يحمي الغلاف من التآكل .

القابلوات المضغوطة . حيث يمنع فيها تكون الفجوات . تشتغل بدرجة حرارة موصل 85° مئوية في القنوات . لأن لها غلافاً خارجياً متيناً وفي حالة اخفاق الغلاف فان هبوط الضغط سيشير الى العطب مما يمكن اصلاحه وحسب الحاجة بدون حدوث اخفاق كهربائي بسبب دخول الرطوبة .

5.8 الأعتبارات الحرارية وتقنين التيار

Thermal Considerations and Current Rating

القابلوات اما ان تمد مباشرة في الأرض أو تسحب في قنوات أو أنابيب . يفضل استعمال الطريقة الأولى كلما كان ذلك ممكناً لأنها أسهل وأرخص وتبديد الحرارة فيها أفضل . اذا كان هناك أكثر من مغذ واحد في الأخدود نفسه فان قابلوات الدائرتين ستمد بحيث يبتعد بعضها عن بعض مسافة قدم واحد أو أكثر لكي نحد من الحرارة المتبادلة ونتجنب تأثير خطأ في قابلو احدى الدائرتين على الأخرى . تمد القابلوات في قعر أخدود مفتوح وتغطى بالتراب أو بنوع خاص من الرمل . عندما تكون ثلاثة قابلوات أحادية اللب مترابطة مصممة دائرة ثلاثية الطور فانها تمد بحيث يكون بعضها أقرب مايمكن من بعض لتجنب مفاقيد زائدة للغلاف وكذلك فان المحاثة ستقل . اذا استعملنا ترابطاً متقاطعاً فان تقنين التيار يمكن أن يزاد بصورة جوهرية بسبب ازالة التيارات الدوارة للغلاف وبسبب امكانية زيادة المباعدة بين المراكز الى 25 سم أو أكثر .

من تبديد الحرارة يمكن أن تتحدد القابلية القصوى لتحميل التيار . أي التيار المقنن . لدرجة حرارة موصل ما مسموح بها قصوى محددة . الحرارة المتولدة في الموصلات

بصورة كبيرة بين تربة وأخرى . فمثلا تتغيرمن $^{\circ}C$ cm/watt 60 الى 300°C cm/watt من الطين الرطب الى الرمل الجاف وهذا التبدل يغير تقنين التيار للقابلو الى النصف. لدرجة حرارة قصوى مقدارها 85 مئوية . وهي تتغير كذلك مع الزمن . لأنها تعتمد بصورة ملحوظة على الرطوبة . وبما أن حرارة القابلو تحاول تجفيف التربة القريبة منها . فانها سترفع g_2 محلياً .

كما هو الحال مع الحسابات المجملة في ملخص قصير من هذا النوع . فان العمليات الفيزياوية الفعلية لايمكن تمثيلها بصورة دقيقة في مثل النماذج المثالية البسيطة المعطاة هنا . والخبرة في هذا المجال هي المعين في تحديد أي من الحسابات الأكثر تفصيلاً الموجودة في الكتب الأختصاصية أوفي البحوث المنشورة التي يجب أن تستعمل . لذلك فالهدف من المعادلات المعطاة هنا هو توضيح المبادىء الأساسية فقط .

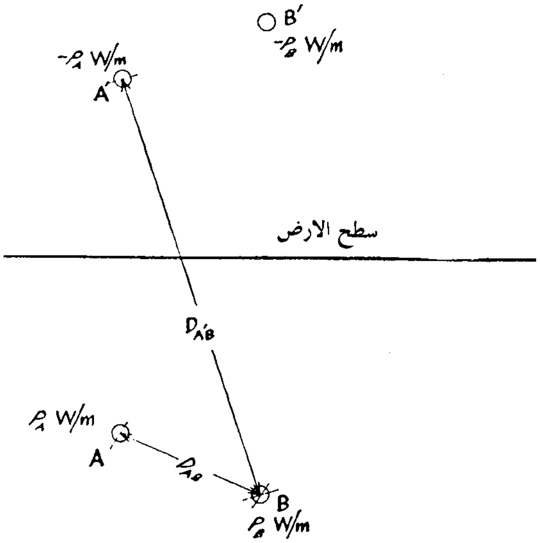
اذا تبصرنا في الحالة المثالية لقابلو مفرد ذي نصف قطر خارجي R_e مدفون d متر تحت سطح الأرض في تربة لها مقاومية ثابتة g_2 . فان المجال الحراري سيكون مشابهاً بالضبط لمجال كهربائي بين موصل خط علوي معلق مفرد والمستوي الأرضي . لذلك فالمقارنة مع المعادلة [3.13] من الفصل 3 تبين أنه لطول l متر

$$G_g = \frac{g_2}{2\pi l} \log_e \frac{2d}{R_e} \quad \text{اوم حراري} \qquad [\ 5.9\ ]$$

تغير في g_2 مقداره 50 يحدث تغيراً في تقنين التيار مقداره 10 الى 30 % بينما زيادة d من 1 متر الى 2 متر سيقلل المقنن بحوالي 5% فقط .

اذا تم مد أكثر من قابلو في اخدود فأن التأثيرا ت الحرارية يجب ان تؤخذ بالحسبان . في الحالة المثالية يمكن القيام بذلك بالتراكب . وباستعمال خيال غاطسات الحرارة . كما مبين في شكل 5.7 . حيث ان P_A ترمز الى قابلو A على أنه مصدر ذو P_A watts/ metre و A' هو الخيال الغاطس ذو $-P_A$ watts/metre .

اذا اعتبرنا الحرارة تجري من متر طول من A لوحده في وسط لانهائي ذي مقاومية ثابتة g_2 (والتي تعتبر ممتدة على اي من جانبـي سطح الارض) فان فرق درجة الحرارة بين B ونقطة X تبعد بمسافة x_1 من A وبمسافة x_2 من A' يكون



شكل 5.7 خيال الغاطسات الحرارية

$$T_1 = P_A \frac{g_2}{2\pi} \log_e \frac{x_1}{D_{AB}}$$

وبالطريقة نفسها اذا اعتبرنا الحرارة تجري الى A' فقط . فان فرق درجة الحرارة المناظر يكون

$$T_2 = \frac{-P_A g_2}{2\pi} \log_e \frac{x_2}{D_{A'B}}.$$

الفرق بين درجة الحرارة بين B و X بسبب A و A' كليهما سيكون

$$T_1 + T_2 = \frac{P_A g_2}{2\pi} \log_e \left(\frac{x_1}{x_2} \cdot \frac{D_{A'B}}{D_{AB}} \right).$$

كلما كان x_1 و x_2 ← ∞ كان x_1/x_2 ← 1 ودرجة الحرارة عند X ستقترب من درجة حرارة المحيط . وهكذا فان ارتفاع درجة حرارة نقطة B فوق درجة حــرارة المحيط بسبب القابلو A تكون

$$\frac{P_A g_2}{2\pi} \log_e \frac{D_{A'B}}{D_{AB}}. \qquad [5.10]$$

وبالتشابه يمكن ان يجمع ارتفاع درجة حرارة القابلو 1 بسبب القابلوات الاخرى في مجموعة كلية ذات عدد n من القابلوات ليعطينا النتيجة التالية

$$\frac{g_2}{2\pi} \sum_{A=2}^{A=n} P_A \log_e \frac{D_{A'1}}{D_{A1}}. \qquad [5.11]$$

ارتفاع درجة الحرارة الكلي للسطح الخارجي للقابلو 1 المدفون تحت عمق d بقدرة متولدة مقدارها P_1 watts/m ستكون كما في المعادلتين [5.9] و [5.1i] وكما يلي

$$T_1 = \frac{g_2}{2\pi} \left[P_1 \log_e \frac{2d}{R_e} + \sum_{A=2}^{A=n} P_A \log_e \frac{D_{A'1}}{D_{A1}} \right] \qquad [5.12]$$

يكون تقنين التيار للقابلوات الممدودة في قنوات اكثر تعقيدا لان هناك عوامل عديدة اخرى . متضمنة مفاقيد الحمل الحراري . يجب ان تؤخذ في الحساب . نتائج مثل هذه الحسابات متوفرة في جداول بيانية وعوامل سماح . وبالتشابه . هنالك بيانات متوفرة لتحديد التيارات عدا الدائمة التي يمكن ان تحمل مثل التحميل الدوري او الاضطراري . أو تقنينات الدورة القصيرة عندما يسمح لدرجات حرارة أعلى من الاعتيادية لفترات محدودة جداً .

هناك عدد من الطرق . تحت الدراسة . لتحسين تبريد القابلوات تحت الارض لكي تزيد من تقنينات تياراتها . في عدد من دوائر قابلو 275 كيلوفولت . تم دفن أنابيب منفصلة تحمل ماء قرب القابلوات . هذه الطريقة محاسن أضافية وهي السماح للقابلوات بالمد قريبة من بعضها وباستعمال أخدود واحد لدائرتين . بحيث ان كلفة الاخاديد ستقل مما قد يجعل أختيار المسار اكثر سهولة . المشاريع الاخرى الممكنة . تشمل استعمال أنابيب يغطس فيها القابلو في الماء . والقابلوات الفائقة التوصيل التي ليس لها فعلياً اية مقاومة .

مفاقيد قابلوات الـ d.c. تكون اقل من تلك التي للـ a.c. لانه مع القابلوا الـ d.c. :

(أ) لايوجد تأثير قشري وبذلك نتجنب البنية الخاصة .

(ب) فقد القدرة في العازل يكون قليلا لانه يكون بسبب تيار التسرب فقط .

(ج) مفاقيد الغلاف تكون قليلة لانها تكون بسبب تيارات التسرب والتيارات المويجية . بحيث انه سوف لانحتاج الى معدات الترابط العرضي وتجنب فولتيات الغلاف سيقلل نقاط الربط وبذلك ستتمكن من استعمال أطوال اكثر طولا .

(د) لايوجد تيار شحن دائمي وبذلك سوف لانحتاج الى مفاعلات مربوطة على التوازي عند نهاية التجهيز من القابلو لكي تأخذ تيارا متأخرا معادلا . كذلك فانه لن تنشأ اية صعوبة من تيار الحمل كما هو الحال في قابلوا الـ a.c. الذي سيكون محددا بتيار الشحن الخاص به والذي قد يقارب تيار الحمل في اميال قليلة نسبيا في قابلو الجهد الفائق (E.H.V. cable) وبذلك يكون من الضروري عند اضافة اطوال اخرى أضافة معادل متفاعل عند نهاية الحمل (انظر الفقرة 1.5) . (لقابلوات 132 و 275 و 400 كيلوفولت تصبح كيلوفولت امبير الحمل والشحن تقريبا متساوية في 70 و 50 و 40 كم على التوالي)

نتيجة لهذه العوامل ستزداد قابلية تحميل التيار لموصلات الـ d.c. بكميات تتغير من حوالي 10 % لمقطع 6 سم² الى حوالي 18 % لمقطع 20 سم² .

المزية العظيمة لاشتغال الـ d.c. من ناحية اخرى . هي ان اجهاد انهيار الـ d.c. لعازل قابلو مملوء بالزيت ذي حوالي 1000 كيلوفولت سم تكون تقريبا ثلاثة أضعاف تلك التي تكون لانهيار تردد 50 هيرتز بحيث ان اجهاد الاشتغال يمكن ان يرفع بعامل مقداره 3 الى حوالي 400 كيلوفولت سم . آنئذ يمكن لقابلوين d.c. حمل قدره اكثر من 2.5 مرة للقدرة التي تحملها ثلاثة قابلوات a.c. والتي لها الكلفة الكلية ذاتها . هذه الزيادة في اجهاد الاشتغال تشمل السيطرة على الفولتيات العابرة حيث انها يجب ان لاتصل الى 2.5 مرة بقدر الفولتية المقننة لان الشدة الدفعية لعازل قابلو مملوء بالزيت تكون حوالي 1000 كيلوفولت سم . قابلوات الـ D.C. تم تطويرها كليا الان لكي تتحمل الى حد 600 كيلوفولت .

يعتمد توزيع الفولتية في قابلوا الـ d.c على مقاومة العازل بدلا من ان يعتمد على

السعة كما هو الحال في تشغيل الـ a.c. . من المعادلة [5.6] . يكون تيار التسرب الجاري متر طول لفولتية مستمرة V بين الموصل والغلاف كما يلي

$$\frac{2\pi V}{\rho \log_e (R/r)} \text{ A/metre.}$$

الفولتية عبر السمك العرضي dx عند نصف قطر x ($r<x<R$) تكون

$$\frac{2\pi V}{\rho \log_e (R/r)} \cdot \frac{\rho\, dx}{2\pi x} = \frac{V\, dx}{x \log_e (R/r)}$$

والاجهاد عند نصف القطر هذا يكون كما هو معطى بالمعادلة التالية

$$E_x = \frac{V}{x \log_e (R/r)} \text{ V/m}$$

والذي له القيمة نفسها كما في تشغيل الـ a.c. (المعادلة [5.4]) والاجهاد الاقصى مرة اخرى عند سطح الموصل وله القيمة

$$\frac{V}{r \log_e (R/r)} \text{ V/m.}$$

لقد افترضنا هنا ان المقاومية الكهربائية للعازل تكون ثابتة في كل مكان وهو افتراض ليس صحيحا لانها دالة للحرارة ـ عند درجة حرارة $T°$

$$\rho_T = \rho_o e^{-\alpha T}$$

حيث ان ρ_o هي المقاومية عند درجة الحرارة القياسية المعطاة و α هي ثابت لعازل معين . بما أنه بعد مضي بعض الوقت على حمل معين ستتغير المقاومية من قيمة دنيا عند سطح الموصل حيث تكون اعظم درجة حرارة الى القيمة القصوى عند الغلاف او المشبك فمن الممكن للاجهاد عند المشبك ان يتجاوز ذلك الذي عند الموصل . يجب ان نكون حذرين لكي نضمن انه سوف لايتجاوز اجهاد الاشتغال المصمم . بناءا عليه يجب ان يكون لقابلو الـ d.c. درجة حرارة قصوى مقدارها 85 مئوية فقط مثل قابلو الـ a.c. اذا لم

يتم الوصول انئذ الى تدريج درجة الحرارة التي عندها يحدث انقلاب الاجهاد هذا . نصل هذا الحد الاخير عند درجات حرارة الموصل الواطئة . كلما كان العازل سميكا . اي انه كلما كانت الفولتية اعلى . من جهة اخرى فان هناك بعض التأثيرات المعوضـــة للاجهاد الـكهربائي على المقاومية . بما ان قيمتها لاجهاد E، هي ρ_E التي من المعتقد ان تكون معطاة بالمعادلة

$$\rho_E = \rho_o \, e^{-\beta E}$$

اضافة الـى هذه العوامل . ستنشأ مصاعــب اضافية نتيجــة لشحنات الفضاء التي لاتستجيب مرة واحدة لتغيرات درجة الحرارة العابرة . ولنزوح الرطوبة والتلوث في المجال الـكهربائي .

المراجع

BARNES, C. C. 1966. *Power cables: their design and installation.* Chapman and Hall, London, 2nd edition.

CHERRY, D. M. 'Containing the cost of undergrounding', 1975, *Proc. I.E.E.*, **122,** pp 293–300.

ENDACOTT, J. D. and GOSLING, C. H. 1966. 'D.C. transmission: overhead lines and cables', *Electrical Review*, **178,** No. 8, pp. 301–304.

GOLDENBERG, H. 1957. 'The calculation of cyclic rating factors for cable laid direct in the ground or in ducts', *E.R.A. Report F/T186*; 1958. 'The calculation of continuous current ratings and rating factors for transmission and distribution cables', *E.R.A. Report F/T187*; and 1958. 'The calculation of cyclic rating factors and emergency loading for one or more cables laid direct in the ground or in ducts', *Proc. I.E.E.*, **105,** C, pp. 46–56.

GOODING, H. T. 1966. 'Cable-fault location on power systems'. *Proc. I.E.E.*, **113,** No. 1, pp. 111–119.

GOSLAND, L. & PARR, R. G. 1960. 'A basis for short-circuit ratings for paper-insulated lead-sheathed cables up to 11 kV (copper conductors, unscreened)', *E.R.A. Report F/T195.*

MIRANDA, F. J. & GAZZANA PRIAROGGIA P., 1976. 'Self-contained oil-filled cables. A review of progress'. *Proc. I.E.E.*, **123,** pp 229–238, and 882–886.

ROSS, A., 'Cable practice in electricity-board distribution networks', 1974, *Proc. I.E.E.*, **121** (IIR), pp 1307–1344.

مسائــــل

1 . قابلو محزوم ثلاثـي الطور ثلاثـي اللب له سعة بين الموصلات الثلاثة المربوطة سويةً والغلاف مقدارها 0·6 مايكروفاراد . السعة بين أحد الموصلات والموصلين الآخرين المربوطين الى الغلاف هي 0·7 مايكروفاراد . احسب تيار الشحن المجهز الى كل موصل عند ربط القابلو الى مصدر 6.6 كيلو فولت ثلاثـي الطـور ذي تردد 50 هيرتز . (1·14 A) (H.N.D.)

2 . قابلو يتألف من موصل له قطر ملم مغطى بمادة عازلة سمكها 1 ملم وله مقاومة عزل مقدارها 480 ميكا اوم / كم . ما سمك المادة المماثلة التي نحتاجهـا لموصل قطره 3 ملم لـكـي تعطينا مقاومة عزل مقدارها 960 ميكا أوم / كم.

(H.N.C.) (4·5 mm)

3 . موصل وسطـي ذو نصف قطر r محاط بانبوب معدني مؤرض متحد المركز نصف قطره الداخلـي R . تم مليء الفراغ الذي بينهما بمواد عازلة لهـا سماحيات نسبية مختلفة . من نصف القطر r الى r_1 هي ϵ_{r_1} ومن r_1 الى r_2 هي ϵ_{r_2} .... الخ . اذا سلطنا فرق جهد V بين الموصل والانبوب فأوجد التعبير الرياضـي لتدريج الفولتية عند أي نصف قطر (x) من مركز الأنبـــوب . اذا تم ملء الفراغ بعازلين . داخلـي له سماحية نسبية مقدارها 5 وخارجـي 2·5 . فاحسب عند أي قيمة لـ r_1 ستقاوم المادتان فولتيتين متساويتين اذا كان $R = 5$ سم و $r = 1$ سم .

$$\left(2\cdot9\ \text{cm}, E_x = \frac{V}{\epsilon_{r_x} \cdot x\left[\frac{1}{\epsilon_{r_1}}\log_e\frac{r_1}{r} + \frac{1}{\epsilon_{r_2}}\log_e\frac{r_2}{r_1} + \ldots\right]}\right)$$ (جامعة لندن)

4 . قابلو احادي اللب ذو عازل متجانس له نصف قطر موصل r سم ونصف قطر الغلاف R سم . اريد أستعمال غلاف داخلـي مفرد ذي نصف قطر x سم . تدريج الفولتية عند سطح الموصل هو E_1 والذي عند سطح الغلاف الداخلـي الأقرب الى الغلاف الخارجـي هو E_2 . اوجد التعبير الرياضـي الذي يمكننا به تحديد قيمة x التـي تمكن القابلو من مقاومة أعلى فولتية بين اللب والغلاف عندمـا تكون $E_1 > E_2$

(جامعة لندن) $\left(\frac{E_1 r}{x} + E_2 \log_e \frac{R}{x} = E_2\right)$

5 . قابلو محزوم ثلاثــي اللب مربوط الى مصدر 11 كيلو فولت ـ 50 هيرتز . ثلاثــي الطور . كل لب يأخذ تيار شحن مقداره 2 أمبير. C_s هي 0·4 مايكروماراد . احسب زاوية ازاحة الطور بين تيار الشحن الداخل الى اللب 1 والفولتية بيــن اللبين 2 و 3 . احسب كذلك المقادير وعلاقات الطور لمركبات التيار التي تــكون تيار الشحن الــكلــي للب 1 .

(جامعة لندن) ($0{\cdot}69\underline{/30^\circ}$ A، $0{\cdot}69\underline{/-30^\circ}$A , $0{\cdot}8\underline{/0^\circ}$ A, 180°)

6 . اسطوانتان متحدتا المركز لهما نصفا قطرين r و R متر مفصولتان بعازل متجانس ذي اجهاد اشتغال أقصــى E_m فولت / متر . اسطوانة متحدة المركز ثالثة ذات نصف قطر x وذات سمك مهمــل تم وضعها بين هاتين الاسـطوانتيــــن . أوجد تعابير رياضية (أ) منها يمكننا أن نقرر قيمة x لقيم محدوة لـ r و R و (ب) منها يمكننا ايجاد فرق الجهد بين الاسطوانة الثالثة والاسطوانة الخارجية لــكي يمكننا المحافظة على أعلى فولتية ممكنة بين الاسطوانتين الداخلية و الخارجية .

(جامعة لندن) ($(V_{x R} = E_m(x-r; R/x = e^{(1-r/x)})$)

7 . قابلو احادي اللب ممدود في الأرض له موصل ذو قطر 2·5 سم وذو عازل سمكه 4 سم ومقاومية حرارية للعازل ذات 5 أوم متر حراري ومقاومة لب كهربائيــة مقدارها 100 مايكرو أوم متر، وتقنين تيار مقداره 500 أمبير . حدد المقاومــة الحرارية بين الغلاف وسطح الأرض اذا كان فرق درجة الحرارة بين الموصــل وسطح الارض هو 50° مئوية عند التيار المقنن .

(L.C.T.) (0·855 أوم حراري)

8 . قابلو أحادي الطور متحد المركز طوله 2·4 كم مربوط الى قضبان توصيل 50 هيرتز 6·6 كيلوفولت . الموصل الداخلــي له قطر مقداره 1·25 سم والثخن العرضي للعازل هو 0·8سم . السماحية النسبية للعازل هي 3·5 . أوجد kVA الشحن . (H.N.C.) (7·75 kVA)

9 . فولتية أحادية الطور مقدارها 10 كيلو فولت عند تردد مقداره50 هيرتز مسلطــة بين لبين لقابلو محزوم ثلاثــي الطور . السعة من لب الى لب هــي 0·15 مايكرو فاراد والسعة من لب الى غلاف هي 0·1 مايكروفاراد .

احسب (أ) فرق الجهد بين اللب الثالث والغلاف و (ب) تيار الشحن الــكلي المأخوذ من قبل القابلو .

(جامعة لندن)   (0, 0·86 A)

10 . قابلو محزوم ثلاثــي الطور 11 كيلو فولت 50 هيرتز له سعة بين أي لب والغلاف مقدارها 0·5 مايكروفاراد وسعة لب الى لب مقدارها 0·3 مايكروفاراد . أحسب القيمة الانية للتيار بين الغلاف وأي لب تختاره في اللحظة التي يكون فيهــا تيار الشحن المحمول من مثل ذلك اللب عند قيمته القصوى .

جامعة لندن   (1·41 A)

11 . أحسب تيار الشحن المأخوذ بوساطة قابلو من النوع المحزوم الثلاثــي اللب طوله 32 كم عند ربطة الى مصدر ثلاثــي الطور 50 هيرتز مع فولتية مقدارها 20 كيلو فولت بين الخطوط . السعة بين لبين حين يكون اللب الثالث والغلاف معزولين هـــي 0·0625 مايكروفاراد / كم . اذا تم تجهيز مصنع يأخذ قدرة 857 كيلـــو فولت أمبير وبعامل قدرة متاخر 0·7 من النهاية البعيدة للقابلو فأحسب عامـــل القدرة والتيار عند نهاية الارسال للقابلو . أهمل مفاقيد القابلو والمحاثة .

(17·8 A, 0·98, 14·5 A) (H.N.C.)

12 . قابلو متحد المحور له موصل داخلــي اسطوانــي ذو نصف قطر a وموصل خارجي ذو نصف قطر داخلي b . العازل له مقاوميه ρ وسماحيه نسبية ϵ_r . أوجد التعبير الرياضي للسعة / متر طول من القابلو ومنها أوجد تعبيراً رياضياً لمقاومة العازل / متر طول . أفرض أن المقاومية تكون ثابتة ومنتظمة .

نتيجة لتدريج درجة الحرارة في الخدمة . تكون مقاومية المادة العازلة لقابلو متحد المركز ذي فولتية عالية d.c. يعمل عند فولتية V بين الموصلين الداخلــي والخارجــي منسوبة الى نصف القطر x بالتعبير الرياضــي $\rho_x = kx^2$ أوجد توزيع تدريج الفولتية خلال العازل . حدد قيم التدريج عند نصفـــي القطرين الداخلــي والخارجــي اذا كانت $V = 300$ kV و $a = 2·5$ cm و $b = 7·0$ cm . قارن هذه القيم بالقيم التــي كان من الممكن ان تكون لو أن المقاومية كانت منتظمة في كل مكان وعلق على دلالاته .

(جامعة لندن) (42 kV/cm, 117 kV/cm, 98 kV/cm, 35 kV/cm)

13 . ثلاثة قابلوات نحاسية معزولة بالورق مملوءة بالزيت مغلفة بالرصاص احاديـة اللب كل منها له مقطع 16·1 سم² ممدودة سويةً في قناة يجري خلالها مـــاء القابلوات تحمل مصدراً ثلاثــي الطور 400 كيلوفولت 50 هيرتز ذا قدرة 1100 ميكا فولت امبير الى مسافة 3·2 كم . الاقطار الخارجية والداخلية للعازل هـــي

10 سم و 5·45 سم على التوالـي . العوازل الرصاصية الثلاثة مترابطة عرضياً على مراحل .

اذا كان متوسط درجة حرارة النحاس هو 80° مئوية والعازل له سماحية نسبيـة مقدارها 2·25 وعامل قدره مقداره 0·012 فحدد (1) فقد النحاس الـكلـي (2) فقد العازل الـكلـي (3) اجهاد الذروة الـكهربائـي في العازل (4) جريان الماء باللترات لـكل دقيقة . مفاقيد الغلاف تساوي 75 % من قيمة فقد النحاس ودرجة حرارة ماء التبريد ترتفع 6° مئوية عند مرورها مـن خـــلال القناة .

[للنحاس عند 0° مئوية . المقاومية $\rho = 0{\cdot}66\ \mu\Omega\text{-in}$. معامل درجـة الحرارة $\alpha = 0{\cdot}00427$ لـكل درجة مئوية]

(جامعة لندن) (2370, 197 kV/cm, 398 kW, 340 kW)

الفصل السادس

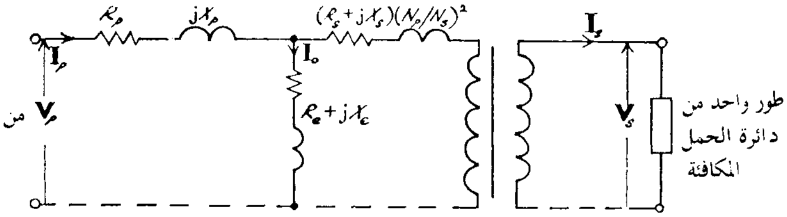
المحولات TRANSFORMERS

6.1 الدائرة المكافئة لمحول ذي ملفين

Equivalent Circuit of a Two-winding Transformer

اذا تم تجهيز محول ثلاثي الطور بفولتية متوازنة ثلاثية الطور وكان الحمل عليه متوازنا . تكون الظروف في كل طور من اطواره متشابهة عدا الازاحة الطورية . يوضح الشكل 6.1 دائرة مكافئة احادية الطور . حيث نسبت ممانعة الثانوي الى الابتدائي . قد تستخدم لتمثيل اشتغال محول مربوط بشكل نجمي نجمي في الحالة المستقرة .

من الخلل عد ممانعة الاثارة للمحول عنصرا خطي الخواص . اي ثابتة . مثلما هي الحالة في ممانعة التوالي وذلك لكون مركبة تيار الاثارة ومركبة تيار فقد القلب يتغيران بصورة غير خطية مع كثافة فيض القلب . وعلى اية حال فان محول القدرة عادة يشتغل عند فولتية وتردد ثابتين تقريبا . لذا فان ممانعة الاثارة تكون ثابتة تقريبا ضمن مدى الاشتغال الاعتيادي ويكون تيار اللاحمل I_e صغيرا جدا اذا ماقورن بالتيار المقنن . ويشار الى التيار المقنن في معظم الاحوال بوصفه مساويا الى 1·0 بنسبة الوحدة . عليه يتغير I_o مع نوع وحجم المحول ويكون عموما مابين 0·02 و 0·04 بنسبة الوحدة (انظر الملحق 1) . كذلك . بما ان معظم طرق حسابات منظومة القدرة تعنى بشبكة يكون كل محول فيها جهازا واحدا من ضمن اجهزة عديدة فانه من المقبول بصورة عامة اهمال التيار I_o بحيث



الشكل .6.1 .

V_p = فولتية خط الى محايد . أي فولتية الطور مسلطة على ملف ابتدائي V_s = فولتية خط الى محايد . أي فولتية الطور عند أطراف الثانوي . I_p = التيار الآتي من المصدر المار في كل ملف طور للابتدائي . I_s = التيار في كل ملف طور للثانوي المار الى دائرة الحمل . I_o = تيار اللاحمل المار في كل طور من الأبتدائي . R_p = المقاومة طور للابتدائي . بالأوم . X_p = المفاعلة التسربية طور للابتدائي بالأوم . R_s = المقاومة طور لثانوي . بالأوم . X_s = المفاعلة التسربية طور للثانوي . بالأوم . $R_e + jX_e$ = ممانعة الأثارة المؤثرة التي يمر فيها تيار اللاحمل I_o . التيار I_o له مركبيتان هما اللتان (أ) تمغنطان القلب و (ب) تجهزان القدرة المفقودة في الحديد بسبب الفيض المتناوب . N_p = عدد لفات الأبتدائي لفة طور . N_s = عدد لفات الثانوي لفة طور .

يمكن حذف ممانعة الاثارة $R_e + j\,X_e$ من الدائرة المكافئة وفي مثل هذه الحالة يتم تطبيق معادلات الخطِ القصير كافة المذكورة في الفقرة 1.2 . من الطبيعي وجود بعض الحالات التي لايمكن عندها تطبيق مثل هذا الافتراض ومن بينها دراسة تأثير التوافقيات (الفقرة 6.5) وتيار المغنطة الاندفاعي (الفقرة 6.6) او دائرة التتابع الصفري اللازمة في حسابات الاطوار الثلاثة غير المتوازنة (الفقرة 6.10) او في حالة الفولتيات المفرطة للاقلدة (switching over-voltages) التي تنشأ في حالة قطع تيار اللاحمل لمحول ما (انظر الجزء الثاني من هذا الكتاب) اذا اهملت ممانعة الاثارة فعندئذ يمكن تمثيل المحول للحالة المستقرة بمقاومة توال ومفاعلة تسربية سوية مع محول مثالي .

القيم الأومية هذه يمكن ان تنسب الى جهة الابتدائي كما في الشكل 6.1 . او تنسب الى جهة الثانوي . وفي الحالة الاخيرة هذه فان ممانعة مقدارها

$$\left[R_s + R_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2\right] + j\left[X_s + X_p\left(\frac{N_s}{N_p}\right)^2\right] \quad \text{اوم}$$

توضع في دائرة الثانوي اما جهة الابتدائي فتكون بدون ممانعة . مما يجب ملاحظته انه لتحقيق ظروف تصميم كفوءة يجب ان تكون R_s مساوية تقريبا لـ $R_p(N_s/N_p)^2$ وكذلك تكون X_s مساوية بالتقريب لـ $X_p(N_s/N_p)^2$. وتطبيق الظروف نفسها عندما تكون الممانعات منسوبة الى الملف الابتدائي .

من المفيد كثيرا استخدام قيم الممانعات معبرا عنها بنظام نسبة الوحدة وهذا هو الشائع . حيث تكون المقاومة بنسبة الوحدة عند الـ MVA المقننة

$$= \left[R_p + R_s \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2 \right] \times \frac{\text{تيار الطور المقنن للابتدائي}}{\text{تيار الطور المقنن للثانوي}}$$

وتحسب المفاعلة بنسبة الوحدة بالاسلوب نفسه . في الملحق 1 بين انه لقدرة اساس MVA معطاة وعند اشتغال المحول بفولتيتيه المقننتين على كلا جانبيه . فانه توجد هناك قيمة واحدة فقط للممانعة بنسبة الوحدة . واذا استخدمت كميات الثانوي في المعادلة السالفة فان القيم نفسها للمقاومة والمفاعلة معبرا عنها بنسبة الوحدة تنتج بالضبط . وتتراوح ممانعة التوالي لمحول القدرة مابين 0·05 و 0·15 بنسبة الوحدة . وتأخذ جانب القيم العالية في الفولتيات والقدرات العالية . من جانب اخر تكون قيمة ممانعة الاثارة لتيار التتابع الموجب بحدود 25 بنسبة الوحدة في حالة المحول ذي المأخذ المتغير حيث يمكن لنسبة اللفات ان تتغير عن القيمة الاسمية وهي النسبة بين الفولتيتين الاسميتين المقننتين للمنظومتين المربوطتين اليه . تظهر هناك نقطتان :

(أ) ان هاتين المنظومتين قد تكونان مربوطتين بمحولين (او اكثر) لهما نسب تحويل مختلفة . ويمكن التعامل مع هذه الحالة وذلك باسناد جميع الممانعات الاومية الى مستوى فولتية واحد ووضع محولات مثالية على التوالي مع تلك التي لها مآخذ تغيير غير أسمية (off-nominal taps) وذلك للسماح للاختلاف بالفولتية .

(ب) قد تتغير الممانعة مع تغير موضع المآخذ مع ان الهدف الرئيسي في تصميم المآخذ المتغيرة هو جعل هذا التغير اقل مايمكن .

اذا كان ربط احد ملفات هذه المحولات مثلثي الشكل فان الممانعات الاومية تبقى منسوبة الى الملف الآخر وذلك بضربها بمربع نسبة اللفات طور

واذا نسبت الممانعات بهذه الطريقة من الملفات نجمية الربط الى الملفات المربوطة بشكل مثلثي . تربط هذه الممانعات وتلك التي للملف الاخير على شكل مثلثي . والممانعات المتساوية هذه (Z) والمربوطة بشكل مثلثي يمكن بعدئذ تغيرها بممانعات مكافئة مقدار كل منها (Z/3) مربوطة بشكل نجمي وذلك باستخدام تحويل الربط المثلثي الى نجمي (انظر الملحق 2) .

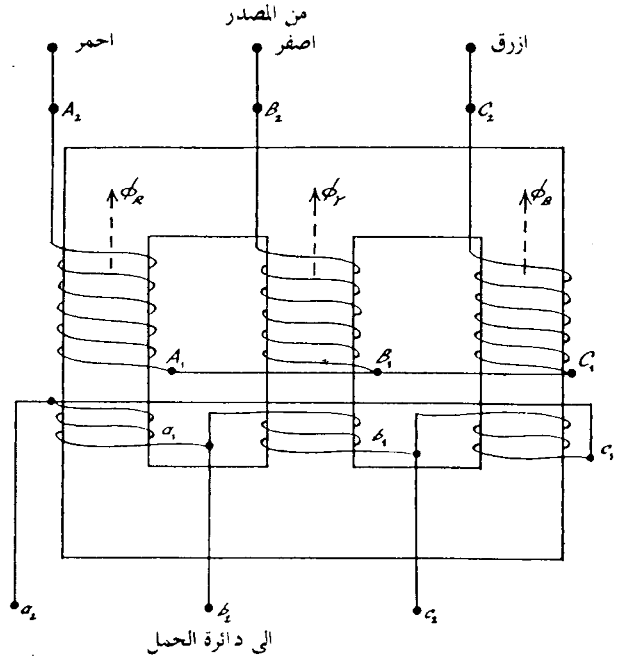
عندئذ يمكن أن نأخذ ملفاً نجمي الربط بالممانعات الجديدة ليعطينا فولتية وتيار الخط نفسهما . واذا عبر عن الممانعات بنظام نسبة الوحدة حينئذ تكون غير معتمدة على اسلوب الربط ان كان مثلثيا أو نجمياً . ولا تشكل طريقة ربط ملفات المحولات مشكلاً عند احتساب تيارات المنظومة الا ان تكون هناك حاجة لاحتساب التيارات الفعلية ضمن اطوار المحول نفسه .

6.2 انواع المحولات الثلاثية الطور ذات الملفين

3-phase Two-winding Transformer Types

بصورة عامة تكون المحولات الثلاثية الطور اما من نوع القلب الثلاثي الافرع أو تحتوي على مجموعة من ثلاث وحدات احادية الطور منفصلة . والترتيب الاخير هذا يقلل من الوزن وحجم الوحدات الاساسية لتسهيل عملية النقل . لكنه يكون اقل كفاءة واكثر تكليفا من الناحية الاقتصادية ماعدا مسألة كلفة تجهيز المواد الاحتياطية للوحدة الواحدة حيث تعد اقل اذا كان المحلول ذا طور واحد .

يبين الشكل 6.2 ترتيبا لمحول بقلب ذي ثلاثة افرع وبملفات مربوطة على شكل نجمي مثلثي . ان هذا الشكل هو تخطيطي بحت . اي انه يبين ملفات الابتدائي والثانوي جنبا الى جنب على الفرع الواحد . وهذا الترتيب قد يعطي مفاعلة تسربية عالية . وتصنع بعض المحولات بخمسة أفرع ذلك للحصول على ارتفاع أقل عندما يكون هذا مطلوبا كأن تكون المحولات كبيرة جدا مثل 600-MVA بفولتية 400 ك . ف .



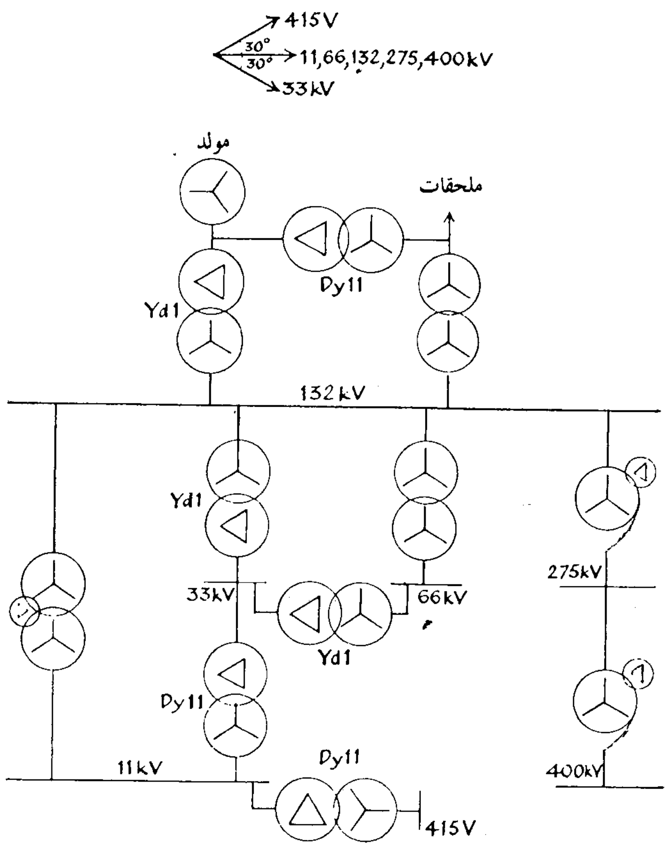
الشكل 6.2 محول ذو قلب بثلاثة افرع وبملفات مربوطة على شكل نجمي مثلثي . بشكل تخطيطي .

وقد تم تبنـي الاصطلاحات التالية في رسم الربط والمخططات الطورية للمحولات (طبقا للمواصفات القياسية البريطانية B.S. 171) . ملف الفولتية العالية .H.V اعطـى حروفا أبجدية كبيرة . اما ملف الفولتية الواطئة .L.V فاعطـى حروفـا صغيرة . الرمز السفلـي 1 يمثل طرف المحايد (اذا كان موجودا) . اما الرمـز السفلـي 2 (أو اكثر اذا كان هناك ماخذ للمحول) فيمثل طرف الخط . اما تاشيـر القطبية فيكون بحيث ان الق . د . ك تكون لحظية وفي الطور نفسه بين الاطراف مـع تأشيراتها المناظرة . اي أنه في اللحظة التـي يكون فيها فرق الجهد لـ A_1 بالنسبة الى A_2 عند قيمته القصوى الموجبة . يكون فرق الجهد لـ a_1 بالنسبة الى a_2 عند القيمة القصوى الموجبة أيضا .

لاغراض تقليل التوافقيات التـي سيتم مناقشتها في الفقرة 6.5 يكون الربـط المثلثـي مفضلا في كثير من محولات القدرة . وقد يستعمل ملف ثالث (الثالثـي) في بعض محولات القدرة ذات الحجوم الـكبيـرة فقط والتـي يمكن ان تربط بشكـل مثلثـي .

6.3 ازاحة الطور Phase Shift

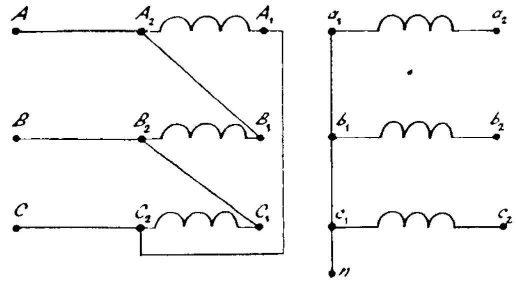
اذا ربطت كل من ملفات الابتدائي والثانوي بالطريقة نفسها . اما بشكل نجمي أو مثلثي وتم توصيل اطراف الملفات المناظرة . فعندئذ سوف لاتكون هناك أية ازاحة في الطور بين الفولتيات المتناظرة لاي طور الى المحايد على اي من جهتي المحلول (مع انه قد يحدث فرق طور مقداره $180°$. فيما لو ربطت الاطراف A_1 و B_1 و C_1 مثلاً لتشكيل نقطة تفرع نجمي على جهة الابتدائي وربطت كذلك a_2 . b_2 و c_2 على جهة الثانوي) .

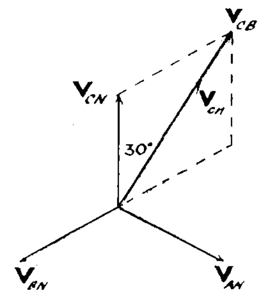


الشكل 6.3 ربط نموذجي لمحول قدرة .

عليه توجد محولات مختلفة لها ربط مختلف في الشبكة الكبرى التابعة لهيئة التولد والطاقة الكهربائية والمؤسسات التابعة لها وكما موضح في الشكل6.3. ومنه

هذا في بريطانيا (المترجمان) .



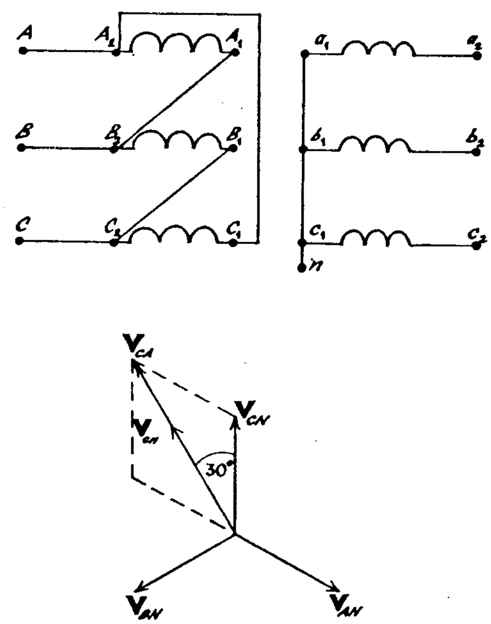


الشكل 6.4 ربط مثلثي نجمي Dy 1

يمكن بيان عدم وجود فرق طور بين منظومة 400 ك . ف ومنظومة 11 ك . ف ولكن منظومة 415 فولت لها أطوار فولتية تسبق تلك التي لمنظومة 11 ك . ف. بزاوية مقدارها °30 . وبسبب ظهور فرق طور مقداره °30 بين قضبان 132 ك . ف و 33 ك . ف . فان محولات 33/11 ك . ف يجب ان تعطي ازاحة خلفية مقدارها °30 . والسبب في ظهور ازاحة °30 امامية او خلفية في محول مثلثي نجمي او نجمي مثلثي يمكن ان يتبين من الشكلين 6.4 و 6.5 .

في حالة الربط Dy 1 المبين في الشكل 6.4 تكون الفولتية عبر ملف الطور C . للابتدائي هي $V_{CB} = V_{CN}+V_{NB} = V_{CN}-V_{BN}$. وهذه الفولتية تكون في الطور نفسه مع الفولتية V_{cn} عبر الطور c للثانوي وذلك لان هذين الملفين يكونان مربوطين على الفرع نفسه ويشبكهما الفيض نفسه . عليه فان الفولتية الاخيرة V_{cn} تتأخر بزاوية °30 خلف فولتية الطور المناظرة V_{CN} على جهة الابتدائي . (نقطة المحايد N يمكن ان تكون ظاهرة اوغير ظاهرة فيزياويا فاذا كانت ظاهرة فقد تكون عند نقطة التفرع النجمي لمنوب مربوط بشكل نجمي او ثانوي محول يجهز محول مثلثي نجمي . أو قد يحصل عليها بوساطة محول تأريضي متعرج الربط) .

في حالة الربط بنظام Dy 11 المبين في الشكل 6.5 تصبح الفولتية عبر ملف الطور C للثانوي $\mathbf{V}_{CA} = \mathbf{V}_{CN} - \mathbf{V}_{AN}$. هناك ازاحة طورية مقدارها °30 للامام بين فولتيات الاطوار على جهة الثانوي وفولتيات الاطوار المناظرة لها على جهة الابتدائي .



الشكل 6.5 ربط Dy 11 مثلثي نجمي

6.4 اشتغال المحولات الثلاثية الطور على التوازي

Parallel Operation of 3-phase Transformers

لتحقيق اشتغال مرضٍ للمحولات الثلاثية الطور على التوازي ينبغي ان تتوفر الشروط التاليـــة :

(أ) يجب ان تكون المحولات جميعها من عائلة واحدة فيما يخص ازاحة الطور اي ان جميع الاطوار المربوطة على شكل نجمي يربط بعضها مع البعض على التناظر لتشكيل نقاط محايد . أوكل Dy 11 .. الخ . وعليه فان جميع الاطراف يجب ان تعلم

بصورة صحيحة وتربط الى بعضها بصورة ملائمة . وهذا الشرط يعد اساسياً بصورة مطلقــة .

(ب) يجب ان تمتلك المحولات جميعها نسبة الفولتية نفسها . واذا اختلفت الـق . د . ك للثانوي فسيمر تيار دوار بين المحولات . ولما كانت الملفات لها ممانعة واطئة . فيسمح باختلاف ضئيل جداً فقط بنسب الفولتية بحيث لايؤدي الى مرور تيار دوار له تأثير ملحوظ .

(جـ) ان ممانعات جميع المحولات بنسبة الوحدة والمعبر عنها بتقنين الحمل الكــلي للمحولات نفسها والمقدر بالميكافولت امبير يجب ان تكون متساوية . (وبتعبير آخر عن هذا الشرط . ان ممانعات المحولات الاومية يجب ان تتناسب عكسياً مع القدرة المقننة MVA عند الحمل الكلي) .

سوف يلاحظ لاحقاً أن هذا الشرط يجب ان يتحقق فيما لو تطلب الامر اقتسام الحمل بين المحولات بصورة تتناسب مع قدراتها المقننة . وبذلك تستطيع هذه المحولات تجهيز حمل كلي مساوٍ لقدراتها المقننة .

(د) يجب أن تكون النسبة X/R (مفاعلة التسرب / المقاومة . للملفين معاً) متساوية للمحولات جميعاً . وهذا الشرط يحقق عامل قدرة متساوٍ للمحولات كافة ويعطي اداء اقتصادي . ان سبب ذلك هو تقليل التيارات في المحولات الى أدنى مايمكن لحمل كلي معين . وبالتالي تستطيع المحولات تجهيز حمل أكبر بدون تجاوز تقنياتها الأنفراديــة (MVA) .

6.4.1 النسب المتساوية EQUAL RATIOS

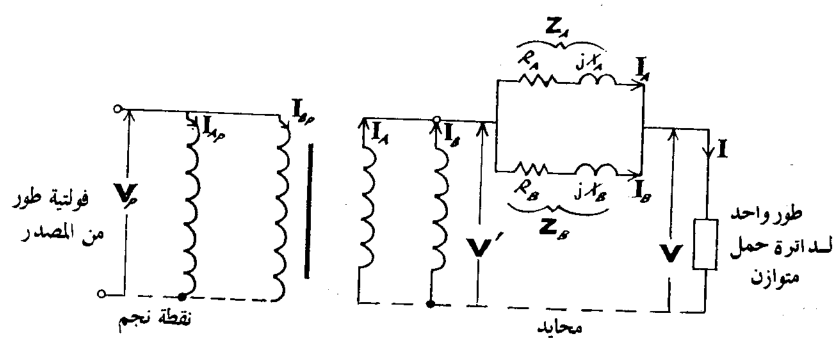
محولان A و B لهما نسب لفات متساوية مربوطان على التوازي ويغذيان حملاً ثلاثي الطور متوازناً . عندما تنسب ممانعة الأبتدائي الى الثانوي وتضاف الى ممانعة الثانوي نفسه تعطي ممانعة كلية مقدارها $\mathbf{Z}_A = R_A + \mathrm{j}\, X_A$ أوم وكذلك $\mathbf{Z}_B = R_B + \mathrm{j}\, X_B$ اوم لـكل المحولين على التوالي وكما مبين في الشكل 6.6 .

توضح الممانعات في الشكل أعلاه بالحروف الكبيرة $\mathbf{Z}$. رغم أنها لاتتغيــر لحظياً وعلى شكل جيبي مع الزمن كماتفعل المطاورات . فهي عوامــل مركبــة أي أن $\mathbf{Z} = R + \mathrm{j}\, X = Z/\theta$ حيث $Z = (R^2 + X^2)^{\frac{1}{2}}$ و $\theta = \tan^{-1} X/R$

من الضروري أستخدام الصيغة المركبة للمانعة Z وليس مقدارها المطلق| Z | فقط أو Z . وهذا صحيح وعملي فيما يخص حسابات منظومات القدرة كافة .

لقد تم رسم الشكل 6.6 لمحول نجمي / نجمي للتبسيط . ويمكن تعويض الملفات المربوطة بشكل مثلثي بمكافئاتها من الملفات المربوطة بشكل نجم. ولتيار في طور واحد من الحمل يعبر عنه بمايلي :

$$\mathbf{I} = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B \qquad [6.1]$$



الشكل 6.6 محولات على التوازي

وتكون فولتية الممانعات متساوية بحيث

$$\mathbf{I}_A\mathbf{Z}_A = \mathbf{I}_B\mathbf{Z}_B. \qquad [6.2]$$

والمعادلتان [6.1] و [6.2] تعطيان

$$\mathbf{I}_A = \mathbf{I}\cdot\frac{\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A+\mathbf{Z}_B} \qquad [6.3]$$

$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}\cdot\frac{\mathbf{Z}_A}{\mathbf{Z}_A+\mathbf{Z}_B}. \qquad [6.4]$$

اذا جهز كل من المحولين A و B قدرتين P_A و P_B بالواط على التعاقب وقدرتين متفاعلتين متأخرتين Q_A و Q_B فعليه (انظر الملحق 4) .

$$P_A + \mathrm{j}\,Q_A = 3\mathbf{V}\mathbf{I}_A^*$$
$$P_B + \mathrm{j}\,Q_B = 3\mathbf{V}\mathbf{I}_B^*$$

حيث أن V هي فولتية الطور الطرفية عبر الحمل . وأن $\mathbf{I}_A^*$ و $\mathbf{I}_B^*$ هما مرافقا التيارين $\mathbf{I}_A$ و $\mathbf{I}_B$. ومن [6.3] وكذلك [6.4] نحصل على

$$P_A + \mathrm{j}\, Q_A = (P + \mathrm{j}\, Q) \cdot \left(\frac{\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B}\right)^* \qquad [6.5]$$

،وكذلك

$$P_B + \mathrm{j}\, Q_B = (P + \mathrm{j}\, Q) \cdot \left(\frac{\mathbf{Z}_A}{\mathbf{Z}_A + \mathbf{Z}_B}\right)^* \qquad [6.6]$$

حيث ان $(P + \mathrm{j}\, Q) = 3\mathbf{VI}^*$ هي الحمل الكلي الذي يجهزه كلا المحولين . وبقسمة [6.5] على [6.6] ينتج

$$\frac{P_A + \mathrm{j}\, Q_A}{P_B + \mathrm{j}\, Q_B} = \left(\frac{\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A}\right)^* . \qquad [6.7]$$

لكي يكون بالأستطاعة تجهيز أقصى حمل ممكن بالفولت أمبير . يجب أن يقتسم المحولان الحمل الكلي بما يتناسب وتقنينيهما . فمثلاً أفرض أن حملاً لمصنع تزايد بحيث ان محول A قدرته 1000-kVA موجود ويراد تقويته بربط محول B قدرته 200-kVA على التوازي معه. فاذا كانت $Z_B/Z_A = 4$ بدلاً من النسبة الصحيحة وهي 5 فأن [6.5] تبين أن المحول الجديد سوف يأخذ 1/5 خمس الحمل الكلي بحيث اذا كان الحمل 1000 kVA فأن المحول الجديد سيكون محملاً كلياً . لذا ينبغي الا تحصل أية زيادة في الحمل على الأطلاق بعد نصب المحول الجديد . وهذا يشير الى أن ماقد يظهر من أختلاف بسيط ونسبي للنسبة الصحيحة للمانعة قد يكون خطره جسيماً . عليه ينبغي لنسبة الأحمال التي يجب ان تكون أيضاً هي نسبة التقنينات أن تعطى من [6.7]

$$\frac{|P_A + \mathrm{j}\, Q_A|}{|P_B + \mathrm{j}\, Q_B|} = \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{\text{تقنين الحمل الكلي للمحول } A}{\text{تقنين الحمل الكلي للمحول } B} = \frac{3VI'_A}{3VI'_B} \qquad [6.8]$$

حيث أن I'_A و I'_B هما التياران المقننان او تيارا الحمل الكلي على جهة الثانوي . تبين المعادلة [6.8] ان الممانعات الأومية يجب أن تتناسب عكسياً مع تقنينات . وعلى أية حال من المفيد جداً في معظم الحالات أستعمال الممانعات معبراً عنها بنسبة الوحدة . فممانعة المحول A بنسبة الوحدة عند تقنية بالفولت أمبير هي $I'_A Z_A/V$ وتلك التي

للمحول B عند تقنيته هي $I'_B Z_B/V$. ومن الطبيعي ملاحظة أن الممانعات بنسبة الوحدة هذه تكون كميات مركبة وبالضبط في صيغة الممانعات الأومية نفسها .

من تعاريف الممانعات هذه بنسبة الوحدة تبين المعادلة [6.8] ان المحولات يجب ان تمتلك ممانعات بنسبة الوحدة متساوية بالمقدار (وكل منهما تكون مسندة الى تقنينها الخاص بها) .

الشكل 6.7 يبين أنه اذا أشتغل المحولان بعاملي قدرة في التانوي مساويين لعامل قدرة الحمل $\cos\phi$. فعليه عند تجهيز حمل كلي معين فأن التيار المار خلالهما يكون أصغر منه فيما لو أشتغل هذان المحولان بعاملي قدرة مختلفين $\cos\phi_A$ و $\cos\phi_B$.

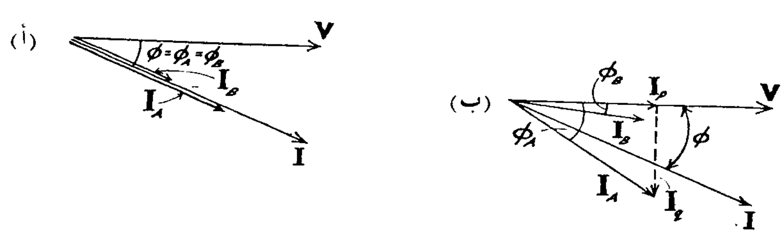
لذلك فاذا كان عاملا القدرة للمحولين متساويين فعندئذ يستطيع هذان المحولان تجهيز حمل كلي أكبر بدون تجاوز تقنيناتهما (انظر الفقرة 1.2.5) .

من الشكل 6.7 (ب) تكون القدرة المزودة للحمل كالآتي

$$P_A = 3VI_p$$
$$Q_A = 3VI_q$$

وكذلك

$$\tan\phi_A = \frac{I_q}{I_p} = \frac{Q_A}{P_A} \qquad [6.9]$$



الشكل 6.7 المخطط الطوري للتانوي (أ) لعوامل قدرة متساوية
(ب) لعوامل قدرة غير متساوية

ويمكن كتابة $\tan \phi_B$ بتعبير مشابه لما ورد أعلاه فلعوامل قدرة متساوية تكون

والنسب المعطاة بالمعادلة [6.7] .

$$\frac{Q_A}{P_A}=\frac{Q_B}{P_B}$$

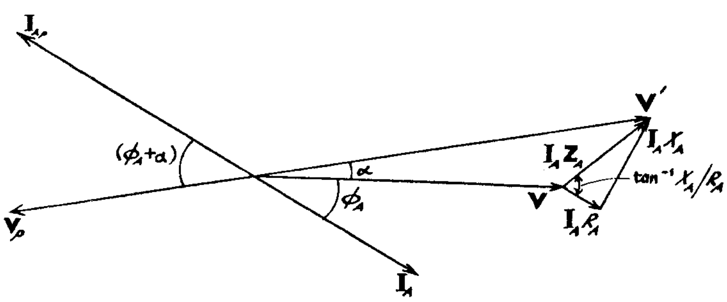
and the ratios given by

$$\frac{P_A+jQ_A}{P_B+jQ_B}=\left(\frac{\mathbf{Z}_B}{\mathbf{Z}_A}\right)^*$$

يجب أن تكون « حقيقية » وهذا يتحقق اذا كانت

$$\frac{X_A}{R_A}=\frac{X_B}{R_B}. \qquad [6.10]$$

مما يجب ملاحظته هو أن عامل القدرة للحمل $\cos \phi$ والذي هو جيب تمام الـزاوية المحصورة بين تيار طور الثانوي وفولتية الطور في الثانوي عبر الحمل لايكون هو نفسه عامل القدرة في الأبتدائي . أي لايساوي جيب تمام الزاوية المحصورة بين التيار والفولتية للطور الواحد في الأبتدائي . ويكون هذا بسبب فولتية ممانعة المحول . ويمكن مشاهدة ذلك من المخطط الطوري المبين في الشكل 6.8 . والذي يمثل ظروف المحو ل A في الشكل 6.6 حيث يكون هنا عامل القدرة لابتدائي المحول A هو $\cos(\phi_A+\alpha)$. واذا تحقـق الشرطان في المعادلتين [6.8] و [6.10] فأن $\mathbf{I}_A$ و $\mathbf{I}_B$ سوف يكونان في الطور نفسه وبذلك يتساوى عاملا القدرة لابتدائي المحولين A و B ويتساوى أيضاً عاملا القدرة لثانوييهما .



الشكل 6.8 المخطط الطوري لمحول واحد

سوف يتوضح أشتغال محولات لها نسب تحويل متساوية على التوازي في مثال محلول. ولكي يبين أنه ليس من الأشكال أسناد الممانعات الى جهة الأبتدائي أو الثانوي سيتم حل المسألة على جهة الأبتدائي بدلاً من التعامل مع جهة الثانوي وكما تم ذلك في هذه الفقرة على الطالب أن يلاحظ أستخدام الرموز $\mathbf{I}_A$ و $\mathbf{I}_B$ لتمثيل تيارات الأبتدائي . في حين أنها قد أستخدمت لتمثيل تيارات الثانوي ضمن هذه الفقرة (للأستفادة ولتجنب أستخدام رموز سفلية متعددة) .

مثال محلول *6.1*

محولان A و B ثلاثيا الطور لهما نسب تحويل متساوية وكل منهما مربوط على شكل نجمي في جهتي الابتدائي والثانوي لهما ويشتغلان على التوازي لتجهيز حمل ما تيار الابتدائي للمحول A هو 100 أمبير وعامل القدرة على جهة الابتدائي هو 0·7 متأخر . احسب عامل القدرة والتيار الابتدائي المحول B . واحسب ايضا عامل قدرة الحمل وتيار الحمل الكلي . كلا المحولين يمتلك عددا من اللفات / طور في الثانوي مساوية لثلاثة اضعاف تلك التي للابتدائي .

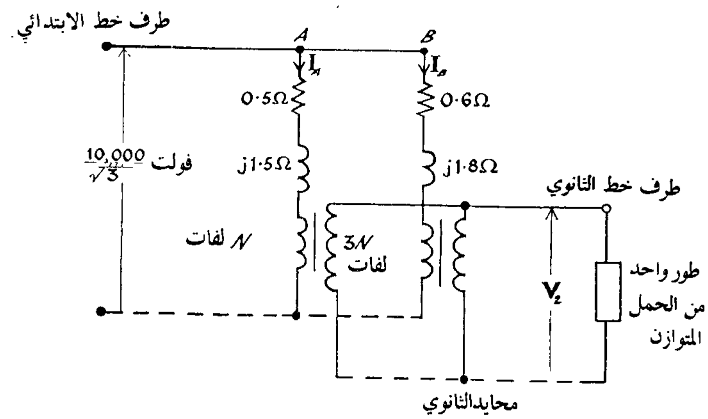
$R_A = 0{\cdot}5$ اوم $X_A = 1{\cdot}5$ اوم $R_B = 0{\cdot}6$ اوم

وكذلك $X_B = 1{\cdot}8$ اوم . حيث أن المقاومات والمفاعلات التسربية المكافئة هذه جميعها منسوبة الى الابتدائي وهي قيم لكل طور .

اذا كانت فولتية الخط للابتدائي هي 10 ك.ف . احسب المقاومة والمفاعلة لكل طور لحمل مفرد مربوط بشكل نجمي والذي يكون مكافئا للحمل الحقيقي . اذا ربطت مفاعلة حثية مقدارها 0·5 أوم بمقاومة مهملة الى المحول A وذلك بين كل طرف من الابتدائي ونقطة المصدر . فاحسب قيمة تيار الابتدائي الجديدة وكذلك عامل قدرته اذا لم تتغير ممانعة الحمل .

الحل

يوضح الشكل 6.9 طورا واحدا من المحولين وكذلك الحمل . واذا أسند الحمل الى الابتدائي فعندئذ يمكن رسم الدائرة المكافئة كما في الشكل 6.10 مع ابتدائي



الشكل 6.9

بدون ممانعة وبحذف ملفات الثانوي .

تيار الابتدائي للمحول A هو $\mathbf{I}_A = 100\times0{\cdot}7 - j\,100(1-0{\cdot}7^2)^{\frac{1}{2}} = 70 - j\,71{\cdot}2$ A

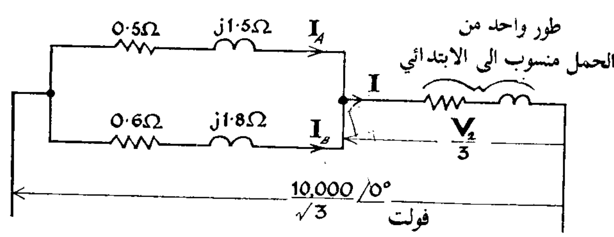
حيث ان المطاور المرجع هو الفولتية المسلطة على طور الابتدائي المناظر . والذي هو $(10\,000/\sqrt{3})\underline{/0^\circ}$ فولت .

وبمساواة هبوط الفولتيات عبر ممانعات المحولين

$$(70 - j\,71{\cdot}2)(0{\cdot}5 + j\,1{\cdot}5) = \mathbf{I}_B(0{\cdot}6 + j\,1{\cdot}8)$$

$$\mathbf{I}_B = \frac{5}{6}(70 - j\,71{\cdot}2) = 58{\cdot}3 - j\,59{\cdot}3 \text{ امبير}$$

$$I_B = (58{\cdot}3^2 + 59{\cdot}3^2)^{\frac{1}{2}} = 83 \text{ أمبير}$$



الشكل 6.10

عامل قدرة ابتدائي المحول B يكون 0·7 وذلك لان $X_A/R_A = X_B/R_B$

(انظر الشرح اواخر الفقرة 6.4.1)

بما ان عاملي القدرة متساويان . يكون التياران I_A و I_B في الطور نفسه بحيث ان

$$I = I_A + I_B = 183 \text{ A.}$$

وهذا هو تيار الحمل منسوبا الى الابتدائي بحيث ان التيار الحقيقي في الحمل هو 183/3 ويساوي 61 أمبير .

ان عامل قدرة الحمل هو جيب تمام الزاوية بين 61 ، امبير و V_2 او بين 183 أمبير و $V_2/3$. والفولتية الاخيرة هذه التي تكون عبر طور واحد من الحمل عندما تنسب الى الابتدائي يمكن ايجادها كما يلي

$$\frac{\mathbf{V}_2}{3} = \frac{10\,000}{\sqrt{3}} - \mathbf{I}_A\mathbf{Z}_A = 5780 - (70 - j\,71{\cdot}2)\,(0{\cdot}5 + j\,1{\cdot}5)$$

$$= 5638 - j\,69 \text{ فولت}$$

$\frac{\mathbf{V}_2}{3}$ تتأخر عن $\frac{10\,000}{\sqrt{3}}$ بزاوية $\tan^{-1}\frac{69}{5638} = 0°\,42'$

183 أمبير يتاخر عن $\frac{10\,000}{\sqrt{3}}$ بزاوية $\cos^{-1} 0{\cdot}7 = 45°\,36'$

183 أمبير يتأخر عن $\frac{\mathbf{V}_2}{3}$ بزاوية $44°\,54'$

عليه يكون عامل قدرة الحمل $= \cos 44°\,54' = 0{\cdot}71$ متاخر

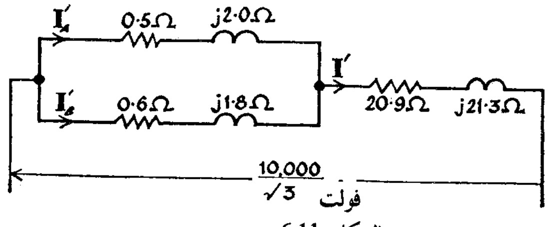
ممانعة الحمل منسوبة الى الابتدائي

$$= \frac{5638 - j\,69}{183(0{\cdot}7 - j\,0{\cdot}712)}\,\Omega = 20{\cdot}9 + j\,21{\cdot}3\,\Omega.$$

كل طور من الحمل المكافيء المربوط بشكل نجم عند طرف الثانوي يكون على هذا الاساس

$$9(20{\cdot}9 + j\,21{\cdot}3)\,\Omega = 188{\cdot}1 + j\,191{\cdot}7\,\Omega.$$

عندما تربط $j\,0{\cdot}5\,\Omega$ أوم على التوالي مع كل طور ابتدائي للمحول A تصبح الدائرة المكافئة كما مبينة في الشكل 6.11 .



الشكل 6.11 .

وممانعة الدخل الكلية في الابتدائي لكل طور هي

$$= 20{\cdot}9 + j\,21{\cdot}3 + \frac{(0{\cdot}5 + j\,2)\,(0{\cdot}6 + j\,1{\cdot}8)}{1{\cdot}1 + j\,3{\cdot}8}\,\Omega$$

$$= 21{\cdot}24 + j\,22{\cdot}25\,\Omega$$

$$\mathbf{I}' = \frac{10\,000}{\sqrt{3}\,(21{\cdot}2 + j\,22{\cdot}25)} = 187{\cdot}8\underline{/-46°\,20'}\ \mathrm{A}$$

$$\mathbf{I}'_A = (129{\cdot}7 - j\,135{\cdot}7)\frac{(0{\cdot}6 + j\,1{\cdot}8)}{(1{\cdot}1 + j\,3{\cdot}8)}$$

$$= 59{\cdot}4 - j\,67{\cdot}4\ \mathrm{A}$$

$$I'_A = 89{\cdot}7\ \mathrm{A}$$

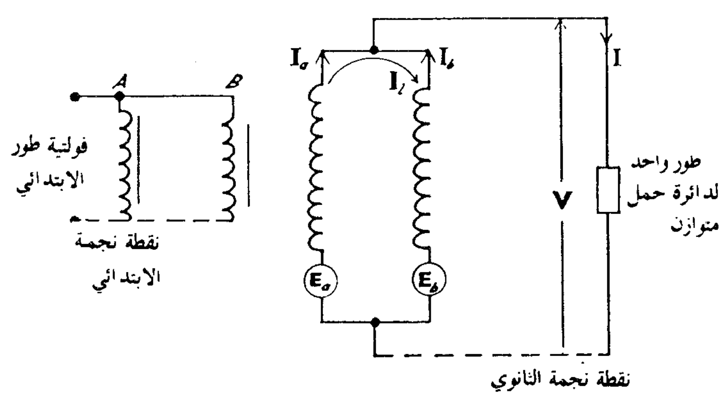
وعامل القدرة للمحول A يكون

$$\cos\left(\tan^{-1}\frac{67{\cdot}4}{59{\cdot}4}\right)$$

$= 0{\cdot}661$ متأخر

6.4.2 النسب غير المتساوية : UNEQUAL RATIOS

اذا كان للمحولين a ، b نسب لفات مختلفة جزئيا . بحيث انه في الدائرة المكافئة وعندما تنسب جميع قيم الممانعات الى الثانوي . تكون القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في الملفات الثانوية هي $\mathbf{E}_a$ ، $\mathbf{E}_b$ حيث $E_a > E_b$. فأن تياراً دواراً موضعيا



الشكل 6.12 محولان بنسب لفات غير متساوية مربوطان على التوازي

$$I_l = \frac{E_a - E_b}{Z_a + Z_b}$$

سوف يجري في ملفات المحول وكما مبين في الشكل 6.12 . واذا أسهم المحـــولان بتياريـــن I'_a , I'_b ضمن تيار الحمـــل الـكلـــي I . فالتيـــارات الحقيقية فـــي المحول تكـــو ن $I_a = (I'_a + I_l)$ و $I_b = (I'_b - I_l)$. أمـــا المعادلة [6.1] فمازالت ممكنة التطبيق حيث ان $I_a + I_b = I$ ولكن المعادلة [6.2] لايمكن ان تطبق وعليه يستعاض عنها بـ

$$(E_a - I_a Z_a) = (E_b - I_b Z_b) = V.$$

والحالة العامة لعدد من المحولات على التوازي مع نسب متساوية او غير متساوية يمكن التعامل معها بصورة افضل اذا ماتم الاستعاضة عن الممانعات الاومية للمحولات بالمسامحات $Y_a = 1/Z_a$ الخ . وكما موضح في الشكل 6.13 . وكذلك ممانعات الطور لدائرة الحمل المكافئة $Z_L = 1/Y_L$. تكون E_a , E_b و ....الخ القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في ثانويات المحول اذا ماتم اسناد جميع الممانعات الى تلك الملفات .

$$I = I_a + I_b + I_c + \ldots.$$
$$I_a = (E_a - V)Y_a \text{ etc.} \qquad [6.11]$$

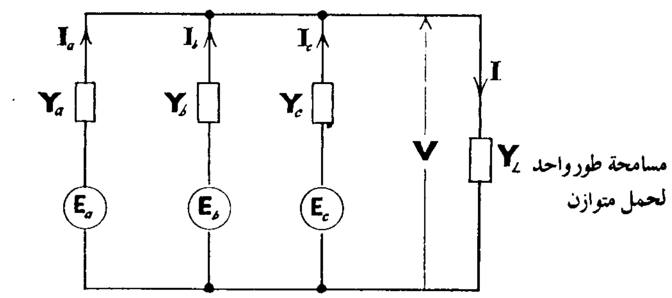
وكذلك

$$I = VY_L$$

بحيث ان

$$VY_L = (E_a - V)Y_a + (E_b - V)Y_b + (E_c - V)Y_c + \ldots$$
$$V = \frac{E_a Y_a + E_b Y_b + E_c Y_c + \ldots}{Y_L + Y_a + Y_b + Y_c + \ldots} = \frac{\Sigma EY}{\Sigma Y} \qquad [6.12]$$

تعرف المعادلة [6.12] باسماء عديدة مثل مولد التوازي . فولتية العقدة او نظرية ميلمان Millman .



الشكل 6.13 . مصادر متعددة على التوازي تجهز حملا مشتركا ستاتيكياً

أخذ بنظر الاعتبار هنا أن الحمل ستاتيكي ولذلك تضاءل الحد الذي يتضمن Y_L في بسط المعادلة [6.12] . وسبب ذلك كونه مضروباً بقوة دافعة كهربائية في فرع الحمل والتي تكون قيمتها صفراً . عندما يتم ايجاد فولتية الطرف من [6.12] يمكن أيضاً ايجاد التيارات في المحولات كل على حدة من [6.11] .

اذا اجريت الحسابات في اعلاه بدلالة الممانعات بدلاً من المسامحات فسوف يلاحظ ان البسط في المعادلة [6.12] هو التيار الكلي المجهز الى دائرة قصيرة عبر الاطراف . والمقام هو مقلوب الممانعة المنظورة من الاطراف للشبكة الهامدة . عليه

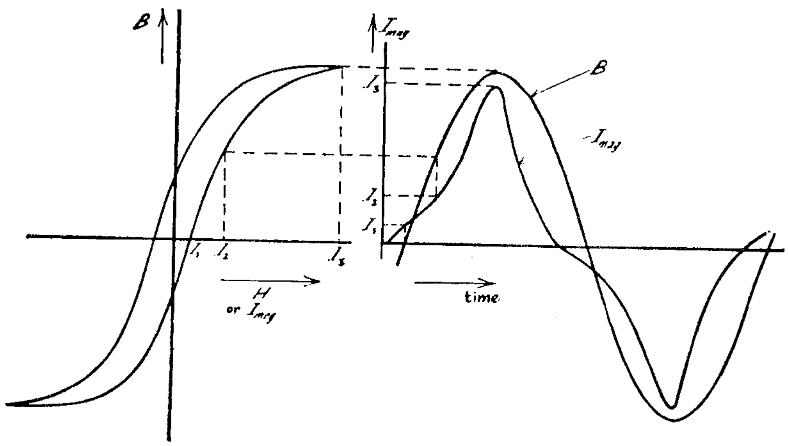
[6.12a] (الفولتية بين الاطراف) = (تيار الدائرة القصيرة عند الاطراف) × (الممانعة المنظورة من الاطراف)

6.5 التوافقيات Harmonics

ان محولات القدرة المربوطة الى منظومة 50 هرتز تجهز بفولتية تكون خالية ظاهريا من التوافقيات جميعا . ويتم الحفاظ على التوافقيات الفردية في فولتية المصدر بدرجة واطئة جدا وذلك باجراء ترتيب مناسب لملفات الساكن والدوار وكذلك الدائرة المغناطيسية في المولدات . ولا تتولد التوافقيات الزوجية (الا في الحالات العابرة وبمقادير صغيرة جدا) .

اذا افترض ان هيأة الموجة لفولتية المصدر 50 هرتز هي موجة جيبية خالصة وكذلك افتراض ان ممانعة المحول بنسبة الوحدة تكون صغيرة . عندئذ تكون ال ق . د . ك المحتثة في الملفات وكثافة فيض القلب B كلتاهما موجة جيبية . ويبتعدان عن هذا الفرض فقط

بسبب هبوط الفولتية في ممانعة المحول نتيجة التوافقيات في التيار . وهذه لا تظهر الا في تيار المغنطة الذي يشكل جزءاً صغيراً جداً من تيار الحمل للمحول وكما سيتم بيانه هنا .



الشكل 6.14 موجة تيار مغنطة مشوهة ناتجة عن كثافة فيض جيبية .

يوضح الشكل 6.14 أن كثافة الفيض تتغير بصورة جيبية مع الزمن اذا احتوى التيار الممغنط على توافقيات وذلك في حديد القلب لمحول يشتغل ضمن المدى الطبيعي لدارة كثافة الفيض شدة المجال B/H . وبما أن دارة B/H تكون متماثلة فان انصاف دورات التيار الموجبة والسالبة تكون متماثلة أيضاً . مشيرة بذلك الى أن التوافقيات التي تزداد بشدة مع زيادة درجة التشبع تكون جميعها فردية ويظهر التوافقي الثالث كونه الأكثر فاعلية .

ان فولتية المصدر تحوي على توافقيات صغيرة فقط لذلك فأنها لا تستطيع تجهيز تيار توافقي كاف للمغنطة . وعلى هذا الاساس فان ال ق . د . مغ. للتوافقيات يجب أن تزود وتقتسم بين ملفات الابتدائي والثانوي والثالثي . واذا لم يكن هناك ملف ثالثي فعندئذ يسري التيار التوافقي بصورة رئيسية في الابتدائي حتى في ظروف الحمل . ذلك لان دائرة الثانوي تحتوي على ممانعة الحمل والتي تكون أعلى نسبيا اذا ما قورنت بالممانعة الواطئة للمصدر . وبسبب عدم ظهور فولتيات السوق التوافقية في المصدر فانها تحتث في الملفات نتيجة الاختلاف الجزئي لموجة الفيض عن شكلها الجيبي .

اذا كانت ممانعة التوالي للمحول هي 0·1 بنسبة الوحدة عند تيار الحمل الكلي . وتيار اللاحمل هو 4 %من التيار المقنن . وكذلك تيار التوافقي الثالث هو 25 %من تيار اللاحمل عند الفولتية والتردد المقننين . عليه فان تيار التوافقي الثالث يكون 1 %من التيار المقنن. هبوط الفولتية للتوافقي الثالث على ممانعة التوالي سوف يكون بالتقريب 3 %من هبوط الممانعة عند الحمل الكلي وذلك لكونه متفاعلاً بصورة رئيسية . عليه تكون حوالي 0·3 % من الفولتية المقننة بحيث يكون فيض التوافقي الثالث حوالي 0·1 % فقط من الفيض الاساسي . والتأكد من مرتبة المقدار هذا يشير الى أن ابتعاد الفيض عن الشكل الجيبي لا يكاد يذكر .

يجتمع فيض التوافقيات مع الفيض الاساسي ليعطي محصلة تكون متوسطة بين موجة جيبية وتلك التي تنشأ عن تيار مغنطة جيبي الشكل . واذا كانت ممانعة المصدر للتوافقيات أقل بكثير من ممانعة المحول فعندئذ لا تظهر عملياً فولتية التوافق عبر اطراف المصدر نفسه . وكلما كانت الممانعة لتوافقي معين صغيرة صغر الفيض والق . د . ك لذلك التوافقي . عليه فاذا ربط أحد الملفات الرئيسية أو ملف الثالثي بشكل مثلثي فان فولتية الطور لأي توافقي مهما كانت صغيرة تكون كافية لدفع التيار الذي سيدور في الشبكة وتزود بذلك الق . د . مغ للتوافقيات الثلاثية المطلوبة . هذا مع العلم بان فولتية التوافقيات الثلاثية (الثالث . التاسع . . . . الخ) في كل ملف من ملفات الاطوار تكون بالطور نفسه بعضها مع بعض . وبناء على ذلك فان فيض القلب وفولتية الثانوي وكذلك تيار المغنطة تحتوي هذه كلها على توافقيات ثلاثية أقل بكثير من المحول الذي تكون ملفاته غير مربوطة على شيء مثلثي . واذا كان ملف الأبتدائي مثلثي الربط فعندئذ لاتسري تيارات التوافقيات الثلاثية من المصدر الى المحول . لأن هذه التيارات ستدور حول الشبكة ولايظهر فرق جهد للتردد الثلاثي عند الأطراف حيث أن الق. د. ك للتوافقي الثلاثي ولكل طور تمتص من قبل الممانعة العائدة لها على شكل هبوط بالفولتية . وبالاسلوب نفسه اذا كان الثانوي مثلثي الربط . فالتيارات الدوارة للترددات الثلاثية تسري ضمن المثلثي فقط وليست في دائرة الحمل . وعليه يكون التشويه بسبب التردد الثلاثي في تيار المغنطة الابتدائي وفيض القلب وكذلك فولتية الثانوي صغيرا . أما في المحولات الثلاثية الفرع فيكون تأثير التردد الثلاثي قليلا جدا وليس خطرا مقارنة بالمحولات الخماسية الفرع أو المحولات المبنية من وحدات احادية الطور . للنوع الأول يبين الشكل 6.2 أنه لما كان مجموع فيض التردد الاساسي $\Phi_R + \Phi_Y + \Phi_B = 0$ صفرا فلا حاجة اذن لمسار عودة لهذا الفيض . ولكن فيض الترددات الثلاثية يكون بالطور نفسه في الأفرع الثلاثة ولذلك يكون مسار

العودة لمحصلة الفيض عن طريق الهواء والعازل بصورة كبيرة . لذا تكون قيم هذا الفيض صغيرة. وهذا يطابق اصلاً حالات فيض التتابع – الصفري التي نوقشت في الفقرة 6.10 مع أن الاخير يتغير عند التردد الاساسي (انظر ايضاً الفصل 8) .

اذا كانت نقطة التفرع النجمي لملف ابتدائي لمحول نجمي الربط متصلة مع نقطة محايد المصدر فان تيار الترددات الثلاثية سوف يمر عبر توصيلة المحايد هذه . ولكون ممانعة المصدر صغيرة فان فيض القلب يكون حاوياً على مركبات صغيرة جداً من التوافقيات الثلاثية . اذا لم يوجد مسار للمحايد بحيث لا يمكن لتيار مغنطة الترددات الثلاثية ان يمر من المصدر . واذا لم يكن هناك أيضاً ملف الثالث المربوط بشكل مثلثي فان فيض القلب عندئذ سيحتوي على مركبات الترددات الثلاثية للفيض والتي يكون تأثيرها قاسيا بصورة خاصة في حالة اللاحمل ومثال على ذلك فان النتائج التالية قد أخذت مختبرياً على خازن محول تعليمي transformer bank يتألف من ثلاث وحدات احادية الطور قدرة كل وحدة منها أقل من كيلوفولت امبير واحد : فبدون ربط نقطة التفرع النجمي للابتدائي الى نقطة التفرع النجمي للمصدر مع فتح حلقة الثالثي المربوط بشكل مثلثي ففي حالة اللاحمل . وعندما تكون فولتية المصدر بقيمتها المقننة فان فولتية الثانوي تحتوي على 44 %توافقي ثالث . وعند ربط محايد الابتدائي أو غلق ملف الثالثي المثلثي يقل التوافقي الثالث الى 0·1 و 0·3% على التعاقب . عند اجراء الفحص نفسه على محول ثلاثي الطور من النوع الحاوي على قلب وله الحجم نفسه اتضح ان مقدار مركبة التوافقي الثالث لفولتية الثانوي هو 1% فقط . وذلك عندما يكون المحايد مفتوحاً . وكذلك ملف الثالثي المثلثي. وسبب صغر قيمة التوافقي الثالث يعود الى المعاوقة العالية للمسار المغناطيسي لفيض التوافقي الثالث .

6.6 تيار المغنطة الاندفاعي Magnetising Inrush Current

اذا اغلق اقليد switch يصل مصدر فولتية متناوبا بدائرة احادية الطور تتكون من ملف ذي قلب هواء له محاثة L هنري ومقاومة R أوم . عندئذ يحتوي التيار بصورة عامة على مركبة تيار مستمر عابرة تتضاءل تدريجياً بثابت زمن الدائرة L/R (أنظر الفقرة 7.5) . المركبة العابرة هذه لها قيمة ابتدائية تساوي ذروة التيار المتناوب في الحالة المستقرة . هذا اذا كانت المقاومة صغيرة القيمة بحيث يمكن أهمالها . وقد يحدث ذلك اذا اغلق الأقليد عندما تكون الفولتية صفراً . وعموما تحدث أقصى قيمة للحالة

العابرة اذا اغلق الأقليد عند اللحظة التي تكون الفولتية فيها $V_m \cos(\tan^{-1} \omega L/R)$ الفولتية مصدر $v = V_m \sin \omega t$.

عندما يكون الملف ذا قلب حديد وتكون ذروة كثافة الفيض في منطقة التشبع المغناطيسي . كما هي الحالة في محولات القدرة التي تشتغل بفولتية وتردد طبيعيين عندئذ يشتد التشويه العابر لتيار المغنطة بصورة هائلة . ويعتمد ذلك على شكل منحني B/H ودرجة التشبع وكذلك لحظة غلق الدائرة والمغناطيسية المتبقية في القلب الحديد .

اذا سلطت فولتية تجهيز $v = V_m \sin \omega t$ عند لحظة $t = 0$ على ملف محول له عدد لفات N والذي يفترض اذ تكون مقاومته ومفاعلته التسربية بنسبة الوحدة مهملتين واذا كان أي من الملفات الاخرى مفتوح الدائرة فان ال ق . د . ك اللحظية المحتثة في الملف والتي تساوي في المقدار وتعاكس في الاتجاه الفولتية المسلطة تكون كالآتي

$$-N\frac{d\phi}{dt} = -V_m \sin \omega t$$

ويكون الفيض اللحظي

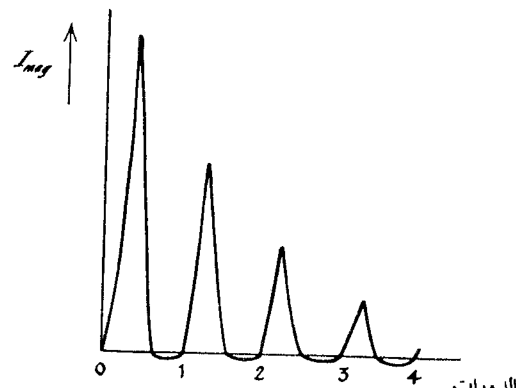
$$\phi = -\frac{V_m}{\omega N}\cos \omega t + A = -\Phi_m \cos \omega t + A.$$

اذا لم تكن هناك مغناطيسية متبقية في القلب تماما قبل لحظة اقفال الأقليد بحيث ان $\phi = 0$. عند اللحظة $t = 0$. فان $A = \Phi_m$ و

$$\phi = \Phi_m[1 - \cos \omega t]. \qquad [6.13]$$

يتبين من هذا أنه بعد مرور نصف دورة من موجة الفولتية ومن لحظة اقفال الدائرة عند فولتية الصفر . فان الفيض قد يصل الى ضعف قيمته الطبيعية .
وهذا في الحقيقة لا يمكن حدوثه لان تغير الفيض ضمن وقت قصير بعد نقطة التشغيل على منحنى المغنطة يسبب تدفق تيار مغنطة كبير بحيث ان هبوط الفولتية عبر الممانعة لا يمكن اهماله في هذه الحالة . ويكون غلق الدائرة عمليا عند نقطة عشوائية على موجة الفولتية . وأسوأ حالة غلق هي عند نقطة الصفر أوقربها وهذه لا تحدث دائما . على اية حال . هناك قليل من المغناطيسية متبقية في القلب . واذا كان الفيض المتبقي هذا باتجاه الفيض المتسبب عن الفولتية المسلطة نفسها فعندئذ يكون التغير السريع واللحظي في الفيض كبيرا . ويزداد تمور تيار المغنطة بصورة كبيرة .

يتضاءل تيار المغنطة العابر بالصورة المبينة في الشكل 6.15 . ولكن الذورة الأولى للتيار قد تتجاوز بصورة ملحوظة القيمة المقننة لتيار المحول. وفي الحالات المتطرفة يمكن ان تصل ذروة التيار الاندفاعي الى عشرين مرة تقريبا بقدر القيمة الطبيعية لتيار الحمل الكلي . وللمحولات التي تكون قدرتها أكبر من 10 MVA يستغرق زمن هبوط الذروة الأولى للتيار الاندفاعي الى 50 % من قيمتها ثانية واحدة أو أكثر (Hudson, 1966) . بناء عليه يجب تأمين حماية لمرحلات الحماية ضد خطأ التشغيل نتيجة التيار الاندفاعي هذا عند توصيل المحول الى دائرة (أنظر حماية الأنحياز التوافقي للمحولات في الفقرة 9.5.1) .



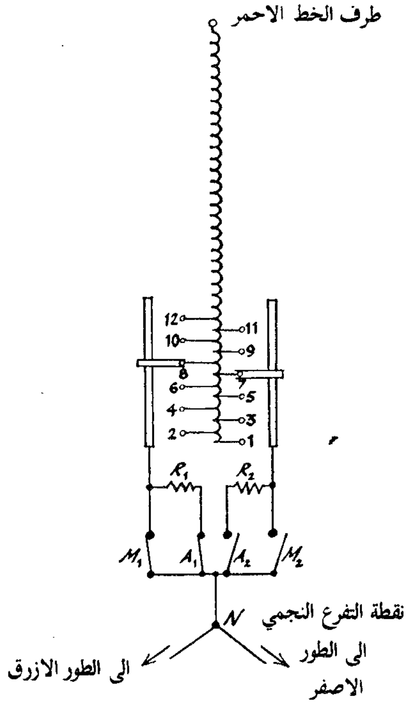
الشكل 6.15 تيار المغنطة الاندفاعي

قد يلاحظ الطلبة هذا التأثير عند انصهار فتيل المصهر في المختبر في حالة توصيـــل محول متغير Variac الى المصدر والى الدائرة حتى في حالة اللاحمل .

ان محولاً متغيراً بقدرة 2-kVA له تيار كلي مقداره 8 أمبير وتيار مغنطة في الحالة المستقرة 0·4 أمبير يمكن ان يعطي تياراً مقداره 60 أمبير خلال الدورة الاولى لفولتية المصدر حتى ولو كانت المغناطيسية المتبقية صفرا .

6.7 تغيير المآخذ Tap Changing

في منظومة قدرة يتطلب تغيير المآخذ على بعض المحولات تحت ظروف التحميل . وذلك لكي يتم تنظيم الفولتية والابقاء على مستواها عند المستهلكين كافة ضمن حدود معينة . على الرغم من التغير في مقدار الحمل وتوزيعه . وتكون المآخذ عادة على ملف الفولتية العالية حيث ان الاخذ على ملفات فولتية واطئة جداً قد لايعطي سيطرة قريبة كافية للفولتية . وتغير المآخذ . بتغير مركبة فولتية المنظومة المتحدة الطور . تؤثر على توزيع القدرة المتفاعلة (vars) في المنظومة ولذلك قد تستخدم هذه الطريقة للسيطرة على تدفق القدرة المتفاعلة نفسها .



الشكل 6.16 مغير مأخذ في حالة الحمل مبين تخطيطياً .

تعتمد مواضع المآخذ على عدد من العوامل . منها تقليل التغير في الممانعة والاجهادات الميكانيكية على الملفات الى ادنى مايمكن حيث يؤدي ذلك الى وضع المآخذ عند منتصف الارجل . بينما توضع المآخذ لمحولات الفولتية العالية جداً ، والتي لها

عازل متدرج بسبب استخدامها في منظومة يكون المحايد فيها مؤرضاً . في نهاية المحايد نفسه . بحيث ان الفولتية الى الأرضي تكون قليلة . ولعمل حماية اضافية ضد تمور الفولتية قد تربط مقاومات لاخطية المميزات عبر المآخذ .

وفي الشكل 6.16 مخطط توضيحي لمغيرمآخذ في حالة الحمل لطورواحد عند نهاية محايد محول فولتية عالية ثلاثي الطور . حيث يرى اقليد اختيار يصل بين النقطتين 7 , 8 ويصل الرابط الرئيسي M_1 المحايد الى النقاط الاخرى . للتحويل الى النقطة 7 يفتح M_1 ويغلق الرابط الثانوي A_2 بحيث تربط المقاومات العابرة R_1 و 2 بصورة وقتية على التوالي عبر الملف وبين النقطتين 7 ، 8 حتى يفتح A_1 ويغلق M_2 . استخدام المقاومات العابرة هذه بدلا من المفاعلات القنطرية ذات المآخذ المركزي يقلل من الشرارة في ملامسات اقليد التبديل .

6.8 التحميل غير المتوازن Unbalanced Loading

اذا ربطت نقطة التفرع النجمي لابتدائي محول ثلاثي الطورمربوطاً بشكل نجمي/ نجمي ويتألف من خازن ذي ثلاث وحدات احادية الطور الى نقطة محايد المصدر عندئذ يتناسب الحمل على كل طور للابتدائي مع ذلك الذي على الطور المناظر له في الثانوي . وعليه تكون درجة اللااتزان متساوية على جهتي المحول . وان لم تربط نقاط التفرع النجمي سوية . فان فولتية الطور للملفات الابتدائية سوف تكون غيرمتوازنة . ويوضع حمل على طور واحد من الملفات الابتدائية فسوف يمر تيار في الطورين الاخرين الذين ليس لهما تيار ثانوي معوض . وبذلك يعمل هذان الطوران عمل خوانق لها مفاعلة كبيرة نسبياً . اما فولتيتاهما فتكون مساوية لفولتية الخط . بينما تكون فولتية الطور الذي عليه حمل قليلة ولهذا السبب تكون فولتية الأطوار للثانوي غير متوازنة . لذا لايستخدم هذا النوع من الربط اذا كان الحمل غيرمتوازن الا اذا كان هناك ملف ثالث (ملف الثالثي) مربوط بشكل مثلثي الذي يهيىء ق.د.مغ . في كل محول . ويحاول بالنتيجة مساواة الفولتيات وتظهر مثل هذه المعضلة في حالة المحول ذي الافرع الخمسة ايضاً .

ولمحول ذي قلب ثلاثي الفرع تكون معاوقة المسار المغناطيسي الذي تعمل عليـــــه الـ ق.د. مغ . اللامتوازنة في الافرع الثلاثة كبيرة نسبياً بحيث ان فيض القلب وفولتيات الطور لاتكون متوازنة الى حد معين .

من الممكن ايجاد توزيع التيار في المحول ذي القلب الثلاثي الفرع أو الخماسي الفرع كما يلي . اذا تم عزل نقطة التفرع النجمي للأبتدائي ومر تيار $\mathbf{I}$ في حمل مربوط بين طرف الثانوي a ونقطة المحايد . فعندها يمكن ايجاد تيارات الطور في الابتدائي $\mathbf{I}_A$ و $\mathbf{I}_B$ و $\mathbf{I}_C$ من تساوي الامبير – لفات للابتدائي والتي يجب ان تكون موجودة بين كل زوج من اطراف الخط ذاته . ذلك لكون ان فولتيات الخط للمصدر تكون متوازنة . واذا كان هناك N_p لفات في كل طور من ملف الابتدائي وكذلك N_s في كل طور من ملف الثانوي . عليه تكون المساواة في الامبير لفات بين الطرفين A و B للابتدائي والثانوي بحيث ان محصلة الامبير – لفات بين أطراف الخط تكون صفراً في جميع الحالات . وهذا يعطي

$$(\mathbf{I}_A-\mathbf{I}_B)N_p-\mathbf{I}N_s = 0 \qquad [6.14]$$

وكذلك بين الطرفين B و C

$$(\mathbf{I}_B-\mathbf{I}_C)N_p = 0.$$

بحيث أن $\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C$ وهذا ظاهر من التماثل . وبتعويضه في $\mathbf{I}_A+\mathbf{I}_B+\mathbf{I}_C=0$ ينتج

$$\mathbf{I}_A = -2\mathbf{I}_B.$$

$\mathbf{I}_B$ ، $\mathbf{I}_A$ يكونان في الطور نفسه سوية وعليه ومن المعادلة [6.14]

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{I}_A &= \frac{2}{3}\mathbf{I}\frac{N_s}{N_p} \\ \mathbf{I}_B = \mathbf{I}_C &= -\frac{1}{3}\mathbf{I}\frac{N_s}{N_p} \end{aligned}\right\} \qquad [6.15]$$

وكما تم شرحه في الفقرة 6.10 . بما ان المعاوقة العالية المسار فيض التتابع الصفري في محول ثلاثي – الطور ذي قلب تحدد من قيمته . فان عدم التوازن في الفيض وازاحة جهد المحايد تكون اقل لهذا النوع من المحولات من تلك المتألفة من ثلاث وحدات احادية الطور .

يساعد وجود ملف الثالثي المربوط مثلثياً (N_t لفات / طور) على استقرار جهد محايد الابتدائي . وذلك لان تيار تتابع صفري قدره $1/3\times\mathbf{I}(N_s/N_t)$ يدور ضمن الشبيكة يعادل الق.د. مغ على الافرع الثلاثة . وهذا التيار لايغير باي حال من الاحوال [6.14] بسبب ان الق.د. مغ لتيار التتابع الصفري على الفرع A تلغي تماماً تلك التي على الفرع

B . وبالاسلوب نفسه فان المعادلة التي تلي [6.14] سوف لاتتغير بحيث ان توزيـــع التيارات في الابتدائي والمعبر عنها بالمعادلة [6.15] لايتأثر بوجود ملف الثالثي المثلثي الربط .

وقد تستخدم طرق المركبات المتماثلة (انظر الفصل 8) لحل حالات التحميل غير المتوازن بديلا لاستخدام موازنة القوة الدافعة المغناطيسية المبينة في اعلاه . ولكن هذه الطرق لاتتعامل مع التوافقيات التي قد يكون لها تأثير محسوس .

6.9 الدائرة المكافئة لمحول ثلاثي الملف

Three-winding Transformer Equivalent Circuit

اذا أهمل تيار اللاحمل لمحول ثلاثي الملف فيمكن عندئذ رسم دائرة مكافئة مفردة وبسيطة لطور واحد ومنها يمكن تقييم عملية حالات التحميل المتوازنة للملفات الثلاثـة للمحول . ومن المناسب اكثر من ذلك تمثيل الممانعات بنظام نسبة الوحدة . لذلك يجب ان تعطى جميعها الى الاساس نفسه بالميكافولت امبير (MVA) . يتحقق هذا الاعتبار الاخير ذاتياً في المحولات الثنائية الملف حيث ان ملفات الابتدائي والثانوي لها تقنين الـ MVA نفسه. وفي المحولات الثلاثية الملف مع انه قد تكون ملفات الابتدائي والثانوي لها تقنين القدرة MVA نفسه . وقد لاتكون . فان ملف الثالثي سوف يكون أقل بالطبع

اذا أجريت فحوص الدائرة القصيرة على محول ثلاثي الملف له N_p ، N_s ، N_t لفات / طور وعلى الملفات الثلاثة بالتعاقب يمكن قياس الممانعات الاومية (المتألفة مـن ممانعة ومفاعلة تسربية) الآتية :

z_{ps} = ممانعة مقاسة في دائرة الابتدائي عندما يكون الثانوي مقصور الدائـــرة والثالثي مفتوحاً .

z_{pt} = ممانعة مقاسة في دائرة الابتدائي عندما يكون الثالثي . مقصور الدائـــرة والثانوي مفتوحا .

z'_{st} = ممانعة مقاسة في دائرة الثانوي عندما يكون الثالثـــي مقصــور الدائــرة والابتدائي مفتوحاً .

وقد تسند ايضا z'_{st} الى ملف الابتدائي بحيث ان

$$z_{st} = \left(\frac{N_p}{N_s}\right)^2 z'_{st}.$$

واذا كانت كل من z_p و z_s وكذلك z_t الممانعات الاومية للملفات الثلاثة المنفصلة منسوبة الى مستوى فولتية الأبتدائي . عليه

$$\left.\begin{aligned} z_{ps} &= z_p + z_s \\ z_{pt} &= z_p + z_t \\ z_{st} &= z_s + z_t \end{aligned}\right\} \qquad [6.16]$$

وتكون حصيلة المعادلات [6.16]

$$\left.\begin{aligned} z_p &= \tfrac{1}{2}(z_{ps} + z_{pt} - z_{st}) \\ z_s &= \tfrac{1}{2}(z_{ps} + z_{st} - z_{pt}) \\ z_t &= \tfrac{1}{2}(z_{pt} + z_{st} - z_{ps}) \end{aligned}\right\}. \qquad [6.17]$$

اذا كانت Z_{ps} =الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الى z_{ps} منسوبة الى الـ MVA والفولتية المقننتين للابتدائي

Z_{pt} = الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الى z_{pt} منسوبة الى الـ MVA والفولتيـــة المقننين للأبتدائي .

Z'_{st} = الممانعة بنسبة الوحدة المناظرة الى z'_{st} منسوبة الى الـ MVA والفولتيـــة المقننين للثانوي . وعليه فأن

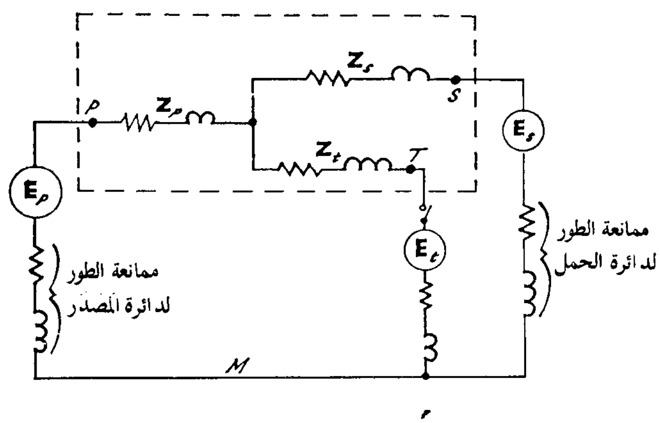
Z_{st} هي الممانعة بنسبة الوحدة بين ملفي الثانوي والثالثي عندما يكون الأبتدائـــــي مفتوحاً ومنسوبة الى MVA والفولتية المقننين للأبتدائي وتعطى كمايلي

$$Z_{st} = Z'_{st} \cdot \frac{\text{MVA للأبتدائي}}{\text{MVA للثانوي}}$$

وبما أن نسبة الفولتيات المقننة هي نفسها نسبة الملفات لذا تصبح [6.17] كالآتي

$$
\left.\begin{aligned}
\mathbf{Z}_p &= \tfrac{1}{2}(\mathbf{Z}_{ps}+\mathbf{Z}_{pt}-\mathbf{Z}_{st})\\
\mathbf{Z}_s &= \tfrac{1}{2}(\mathbf{Z}_{ps}+\mathbf{Z}_{st}-\mathbf{Z}_{pt})\\
\mathbf{Z}_t &= \tfrac{1}{2}(\mathbf{Z}_{pt}+\mathbf{Z}_{st}-\mathbf{Z}_{ps})
\end{aligned}\right\}. \qquad [6.18]
$$

حيث أن $\mathbf{Z}_p$ و $\mathbf{Z}_s$ و $\mathbf{Z}_t$ هي الممانعات بنسبة الوحدة للملفات الثلاثة كل منها منسوبة الى الـ MVA والفولتية المقننين للملف الأبتدائي . قد تربط الآن الممانعات الثلاثة هذه سوية في دائرة نجم مكافئة أحادية الطور وكما مبينة في الشكل 6.17 . ويمثل الجزء ضمن الخطوط المقطعة المحول . وما كان خارج هذه الخطوط يمثل دائرة الربط الخارجيـــة للمحول .



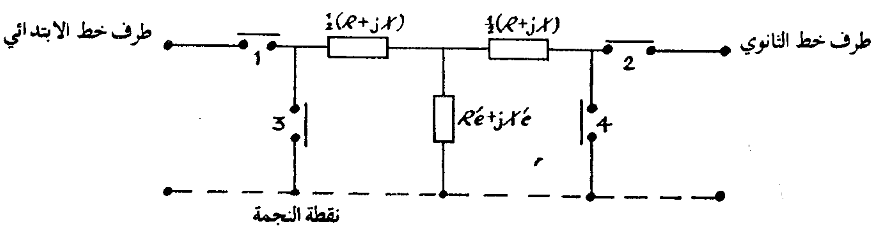
الشكل 6.17 دائرة مكافئة لطور واحد من محول ثلاثي الملف

قد تكون $\mathbf{E}_t$ وكذلك تيار تردد القدرة في الثالثي صفراً اذا أحتوى على ملف مربوط بشكل مثلثي مغلق وغير مربوط لأي منظومة تجهيز او حمل . وفي هذه الحالــة يكون الطرف T معزولاً عن المنظومة . في الحقيقة يدور تيار التردد الثلاثي في ملف الثالثي لـكي ينتج الـ ق. د. مغ. اللازمة للأبقاء على فيض القلب جيبياً بصورة أساسية . ولـكن الشكل 6.17 يعود الى الحالات التي يكون فيها التردد هو تردد القدرة 50-Hz . واذا جهز الثانوي حملاً ستاتيكياً فقط . تكون $\mathbf{E}_s$ صفراً . وتربط S مع M عن طريق ممانعة دائرة الحمل . ترتبط P مع M بفولتية الطور للمصدر $\mathbf{E}_p$ وكذلك ممانعة دائرة المصدر / طور. مما يجب تأكيده هو أن الدائرة الموضحة في الشكل 6.17 تطبق فـــي الحالات المتوازنة . أي الى تيار التتابع الموجب أوتيار التتابع السالب فقط . وتمثل طوراً

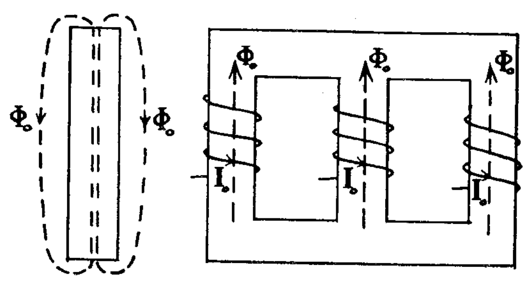
واحداً . يمكن تمثيل المحولات الذاتية الثلاثية الملف والتي تستخدم بصورة شائعة مع فولتيات النقل العالية بدائرة مكافئة مماثلة . لكن هناك أمكانية ترتيبها بشكلين (موزيش لوك وهمغري ديفس . 1952).

6.10 ممانعة التتابع الصفري : Zero-sequence Impedance

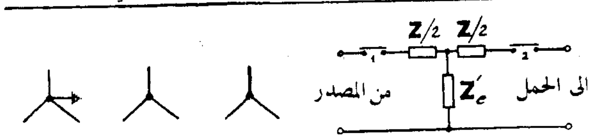
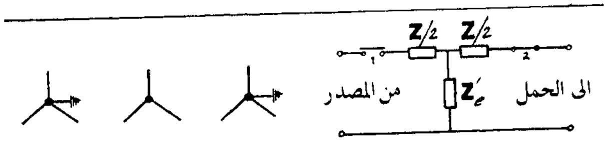
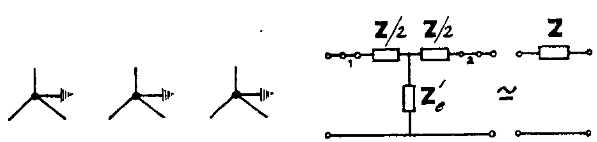
ان الممانعتين Z_1 و Z_2 اللتين يبديهما المحول الى تيار التتابع الموجب وتيار التتابع السالب على التوالي . تكونان مساويتين للقيم المبينة في الشكل 6.1 . الا في حالة محول مثلثي / نجمي بفرق طور 30° فتكون معكوسة الأشارة فيما يخص التتابع السالب مقارنة بتلك التي للتتابع الموجب(انظر الفقرة 8.3.5) . والممانعة التي لتيار التتابع الصفري Z_o قد تكون مساوية لقيمة ممانعة التتابع الموجب تقريباً أو قد تكون مالانهاية . وتعتمد هذه على ربط الملفات . فيما اذا كانت نقاط التفرع النجمي مؤرضة وكذلك تعتمد على نوع الدائرة الدائرة المغناطيسية .

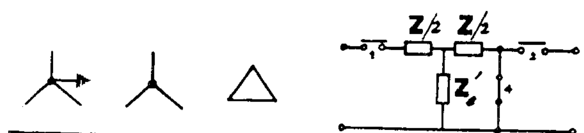
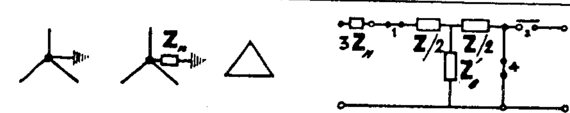
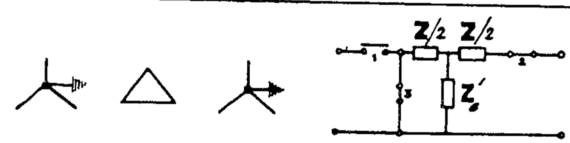


الشكل 6.18 . دائرة التتابع الصفري المكافئة



الشكل 6.19 فيض التتابع الصفري في محول ثلاثي الفرع من النوع ذي القلب .

ممانعة التتابـع الصفري للمحول	شبكة التتابع الصفري للمحول	محول ثانوي	محول ابتدائي	مولد
مالانهاية لكل من الأبتدائي والثانوي . وهذا ينطبق على التساوي اذا كانت نقطة التفرع النجمي للمولد مؤرضة اولا .				
مالانهاية على جهة الأبتدائي . $(Z/2+Z'_e)$ على جهة الثانوي . حيث أن Z'_e تكون أعلى للنوع الهيكلي . والوحدات المنفصلة احادية الطور أو النوع ذي القلب الحديد خماسي الفرع من تلك التي للنوع ذي القلب الحديد الثلاثي الفرع . وتطبق هذه على التساوي فيما لوكانت نقطة التفرع النجمي للمولد مؤرضة أم لا .				
$Z = Z_1 = Z_2 = Z_0$ للنوع الهيكلي أو النوع ذي الوحدات المنفصلة احادية الطور . $Z_0 \simeq 0.85\ Z_1$ لنوع ذي القلب الحديد بسبب الأقتران المتبادل . اذا كانت نقطة المولد غير مؤرضة عندئذ تطبق الدائرة (أعلاه مباشرة) المكافئة .				

مالانهاية على كلا جهتي الابتدائي والثانوي	
مالانهاية على جهة الثانوي $\simeq Z$ على جهة الابتدائي مع وجوب ان تكون نقطة التفرع النجمي للمولد مؤرضة . اما $3Z_n$ فتتضمن مع ممانعة التتابع الصفري لدائرة المصدر .	
مالانهاية على جهة الابتدائي . $\simeq Z$ على جهة الثانوي :	

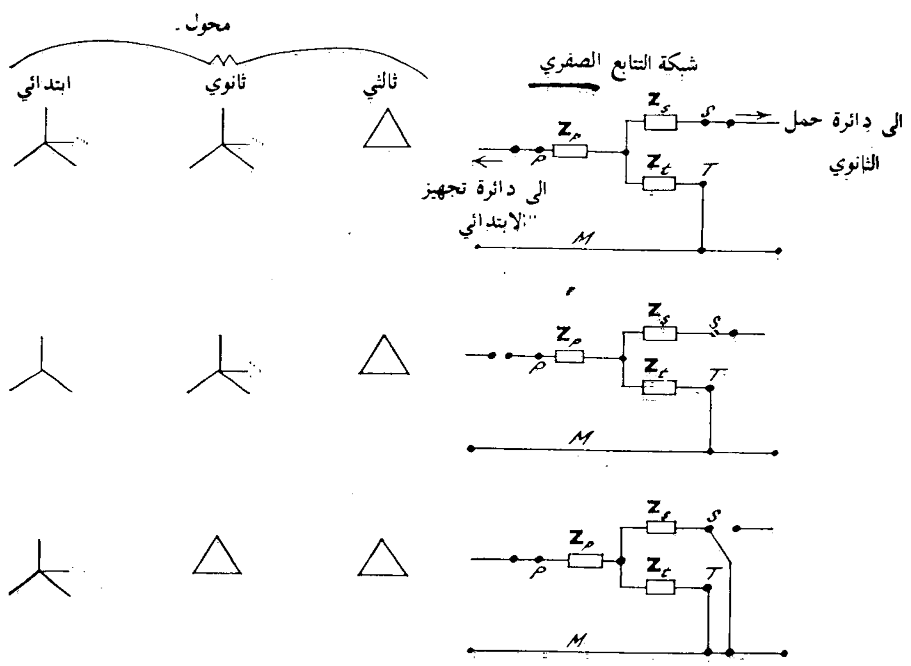
الشكل 6.20 . دوائر التتابع الصفري المكافئة للمحول

يبين الشكل 6.18 دائرة مكافئة لمحول ثنائي الملف فيه $R+jX=\mathbf{Z}$ وهي ممانعة التوالي بنسبة الوحدة للتتابع الموجب الكلية لطور واحد من كلا ملفي الابتدائي والثانوي مجتمعين . وكذلك $R'_e+jX'_e$ هي ممانعة التوازي للتتابع الصفري بنسبة الوحدة (وغالبا ماتسمى بممانعة الاثارة $\mathbf{Z}'_e$) والتي يمر خلالها تيار المغنطة وتيار فقد القلب .

ولتيار التتابع الموجب اوالسالب . تكون ممانعة الاثارة اكبر بكثير من $R+jX$ (اي انها حوالي 25 بنسبة الوحدة مقارنة مع 0·1 بنسبة الوحدة) بحيث ان ممانعة الاثارة عموما تهمل ضمن حسابات منظومة معينة . وكذلك $\mathbf{Z}_1=\mathbf{Z}_2=R+jX$ وعلى كل حال تعتمد ممانعة الاثارة $R_e+jX'_e$ لتيار التتابع الصفري على بنية القلب . ولمحول من النوع الهيكلي الثلاثي القلب او للمحولات المتألفة من ثلاث وحدات احادية الطور لتكون جانب محول ثلاثي الطور . او للمحول ذي القلب الحديد الخماسي الفرع الثلاثي الطور . تكون ممانعة اثارة التتابع الصفري بالمرتبة نفسها كما هو الشأن في التتابع الموجب . وللوحدة الثلاثية الفرع من نوع القلب الحديد فان أفياض التتابع الصفري التي تكون منطبقة الطور بعضها مع بعض في الافرع الثلاثة والمبينة في الشكل 6.19 . ليس لها مسارات عودة في القلب الحديد . بل يجب يجب ان تعبر خلال الهواء . والنحاس والعازل وجدار الوعاء . وبذلك يكون فيض التتابع الصفري محدود القيمة . وتكون ممانعة الاثارة للتتابع الصفري اصغر بكثير من تلك التي للتتابع الموجب . وتقع قيمها عموما في المدى من 0·3 الى 4 بنسبة الوحدة وتكون بأتجاه القيمة العليا لمحولات القدرة الكبيرة .

ينبغي ان يلاحظ انه رغم ان تيارات التوافقي الثالث والترددات الثلاثية الاخرى مشابهة لتيارات التتابع الصفري في كونها منطبقة الطور في الاطوار الثلاثة كلها لدائرة ثلاثية الطور . لهذا السبب تكون مسارات الفيض مشابهة ايضا لهذه التيارات . الا انه هناك أختلافات مهمة فيما بينها . ان تيارات التتابع الصفري لها تردد يساوي التردد الاساسي وعليه يمكن ان تجمع بمخطط المطاورات مع المركبات الاخرى لهذا التردد والتي هي تيارات التتابع الموجب والتتابع السالب (انظر الفصل 8) وبما انه لايمكن في المخطط الطوري تمثيل مركبات لها ترددات متعددة . فانه ليس بالامكان توضيح تيارات التوافقي الثالث والتوافقيات الثلاثية الاخرى في المخططات الطورية المرسومة على اساس التردد الاساسي .

وفيما عدا تأثير البنية هذا على ممانعة الاثارة للتتابع الصفري . فان ٤' تاثيرا كبيرا نسبيا لربط الملفات . وسوف نناقش الان حالات متعددة . فاذا كانت نقطة التفوع النجمي للملف الأبتدائي مؤرضة فأن الوصيل رقم 1 في الشكل 6.18 يكون مغلقاً . واذا كانت نقطة التفرع النجمي للثانوي مؤرضة فأن الوصيل 2 يغلق . وذلك لأن مسار الأرضي يسمح بمرور تيار التتابع الصفري (مع وجوب ربط آخر للأرض . وربما عند حدوث عطل ما) ، اذا كان ملف الابتدائي مربوطا بشكل مثلثي . يغلق الوصيل 3 ويفتح الوصيل 1 . بينما يغلق الوصيل 4 اذا كان الثانوي مربوط بشكل مثلثي ويفتح الوصيل 2 . نظرا لان تيار التتابع الصفري يدور في الملف المربوط بشكل مثلثي . ولكنه لايستطيع المرور في المصدر او دائرة الحمل المربوطة اليه . ويوضح الشكل 6.20 شبكات التتابع الصفري لتوصيلات مختلفة لمحولات ثنائية الملف . ومما يجب ملاحظته هو ان تيار التتابع الصفري يمكن ان يمر في ملف واحد بدون ان يمر ذاتيا في الملف الاخر . ويمر هذا التيار في حالة واحدة وهي حالة عدم التوازن الذي ينتج المعادلة [6.15] عندئذ يمر التيار في ملف الثانوي وليس في الملف الابتدائي .



الشكل 6.21 . بعض من دوائر التتابع الصفري المكافئة لمحولات ثلاثية الملف .

في المحولات الثلاثية الملف . هناك امكانية في ان تيارات التتابع الصفري يمكن ان تتدفق في الملف الثالثي بسبب الدائرة التي يربط اليها هذا الملف . في هذه الحالة يتم اقفال وصيل توال (مشابه الى الوصيل 1 والوصيل 2 في الشكل 6.18) في دائرة التتابع الصفري التي تربط الثالثي الى الدائرة الخارجية (انظر الشكل 6.17) . واذا كان الملف الثالثي مربوطا بشكل مثلثي . فان ال ق . د . ك للتتابع الصفري المحتثة فيه يمكن ان تسبب مرور تيار وتظهرحينئذ ممانعة الثالثي في شبكة التتابع الصفري . لذا ينقسم تيار التتابع الصفري بين هذا الملف وبين الملف الاخر الذي لايكون مربوطا الى دائرة العطل . بموجب قيم الممانعات الخاصة بدوائرهما .

يمكن بناء شبكة التتابع الصفري لمحلول ثلاثي الملف من تأمل الشكلين 6.17 و6.18 ووفقا للطريقة التي تكون بها الملفات مربوطة . يوضح الشكل 6.21 امثلة نموذجية على ذلك حيث ان Z_p وZ_s و Z_t هي الممانعات نفسها التي استخدمت لشبكتي التتابع الموجب او السالب في الشكل 6.17 .

المراجع

HUDSON, A. A. 1966. 'Transformer magnetising inrush current: a resumé of published information', *E.R.A. Report No. 5152.*

MORTLOCK, J. R. & HUMPHREY DAVIES, M. W. 1952. *Power system analysis,* Chapman and Hall, London.

STIGANT, S. A. & LACEY, H. M. 1961. *The J. and P. transformer book,* Johnson and Phillips, London, 9th edition.

B.S. 171, *Power transformers.* British Standards Institution, London.

مسائل

1. محول أحادي الطور لفاته الأبتدائية 480 والثانوية 90 . معدل مسار الفيض في قلبه الحديد 180 سم والمفاصل فيه تكون مكافئة لفجوة هوائية طولها 0·1 ملم. اذا كانت أقصى قيمة لكثافة الفيض هي 1·1 تيسلا عند تسليط فولتية مقدارها 2200 فولت عند تردد 50 هرتز على الأبتدائي . فأحسب :

(أ) مساحة مقطع القلب
(ب) فولتية الثانوي عند اللاحمل
(ج) تيار الأبتدائي وعامل المقدرة عند اللاحمل
أفرض أن الأمبير لفات / متر الى 1·1 تيسلاً تكون 400 . وفقد الحديد المناظر هو 1·77 واط / كغم عند 50 هرتز وكثافة الحديد هي 7·8 .

(الجواب : 187 سم ^{2} . 412·5 فولت . 1·21 أمبير . 0·174)

2. محول أحادي الطور مقنناته 10 kVA ، 230/100 فولت. عندما تكون ملفات الثانوي له مفتوحة الدائرة وملفات الأبتدائي مجهزة بفولتية أسمية(230 ف) يكون تيار الدخل 2·6 أمبير عند عامل قدرة 0·3 . وعندما يكون الثانوي مقصور الدائرة فأن فولتية مقدارها 18 فولت على الأبتدائي تسبب مرور تيار حمل كلي في الثانوي والقدرة الداخلة للأبتدائي في هذه الحالة تكون 240 واط .

أحسب :
(أ) الكفاءة عند حمل كلي له عامل قدرة مقداره واحد .
(ب) الحمل الذي تحدث عنده القيمة العظمى للكفاءة .
(ج) القيمة العظمى للكفاءة .

(**الجواب** : %95·97 ,8·65 kVA , %96·0)

3. محولان ثلاثيا الطور متماثلان ربطاهما نجمي / نجمي . أحدهما مربوط عند جهة المولد والآخر عند جهة المحطة الثانوية لقابلو ارضي 33 ك. ف. مقاومة كل موصل من القابلو هي 7·17 اوم ومفاعلته الحثية هي 2 أوم .

كل محول 6.6/33 ك . ف. له مقاومة مكافئة مقدارها 0.04 أوم لكل طور ومفاعلة تسربية مقدارها 0.4 اوم لكل طور منسوبتان الى جهة الفولتية الواطئة .

اذا تم تزويد 5000 كيلوواط بفولتية 6 ك. ف وعامل قدرة متأخر 0.8 على جهة الفولتية الواطئة لمحول المحطة الثانوية. فأحسب الفولتية على جهة الفولتية الواطئة للمحول عند محطة التوليد . مبيناً الأفتراضات التي تم عملها

(الجواب 6880 فولت)

4. ثلاث محولات أحادية الطور كل منها 50-kVA , 2400/240 فولت مربوطة بشكل نجمي مثلثي لتؤلف خازن محولات ثلاثي الطور قدرته 150-kVA لغرض تخفيض الفولتية عند جهة الحمل لمغذي ممانعته 0.15 + j 0.1 اوم طور . وفولتية الخط عند نهاية الأرسال للمغذي هي 4160 فولت . وعلى جهة الثانويات تغذي المحولات حملاً متوازناً ثلاثي الطور خلال مغذ ممانعته 0.0005 + j 0.0020 اوم طور . وقراءات فحص الدائرة القصيرة لكل محول أحادي الطور هي 48ف. 20.8 أمبير و617 واط مقاسة على جهة الفولتية العالية (H.V) .

جد فولتية الخط عند الحمل عندما يسحب الحمل تيارا مقننا من المحولات بعامل قدرة متأخر 0.8 .

(الجواب : 232.9 ف)

5. محول ثلاثي الطور مربوط بشكل نجمي على كلا جانبيه الأبتدائي والثانوي. ويجهز حملا خلال خط نقل المقاومة المكافئة للحمل الى المحايد مقدارها 400 اوم والمفاعلة 600 اوم . كل موصل من موصلات خط النقل له مقاومة 4 اوم ومفاعلة 6 اوم . ملف الثانوي للمحول له عدد من اللفات تعادل ثلاثة أمثال اللفات طور للابتدائي أما المحول فله

مقاومة 0.5 اوم طور ومفاعلة تسربية 2.5 اوم طور : للابتدائي. مقاومة 5 اوم طور ومفاعلة تسربية 25 اوم طور : للثانوي. اذا كانت فولتية الخط للأبتدائي 11 ك . ف فأحسب فولتية الطرف للثانوي .

(الجواب : 31.2 ك . ف)

6. محولان ثلاثيا الطور A و B ربطاهما نجمي / نجمي وفولتيتاهما 6600/440 فولت . قدرة المحول A هي 250 kVA وقدرة المحول B هي 500 kVA .
لهما ممانعة / طور منسوبة الى جهة الثانوي كالاتي : للمحول A :
$R = 0{\cdot}008$ أوم ، $X = 0{\cdot}035$ أوم . للمحول B : $R = 0{\cdot}003$ أوم و $X = 0{\cdot}019$ أوم .
كيف يقتسم هذان المحولان حملاً مقداره 600 kVA بعامل قدرة متأخر 0·8 اذا كانت فولتية الحمل 440؟ احسب أيضاً الـ kVA وعامل القدرة لكل محول
(الجواب : 0·785, 0·82, 392·2 kVA, 208·2 kVA)

محولان ثلاثيا الطور ربطاهما نجمي / نجمي مربوطان على التوازي بفولتية على جهة الابتدائي قدرها 11 000 فولت . عدد اللفات لكل طور لثانوي المحول الاول تعادل ثلاثة امثال عدد لفات الابتدائي لكل طور وعدد اللفات لكل طور لثانوي المحول الثاني تعادل 3·1 عدد لفات الابتدائي لكل طور. مفاعلة كل محول هي 100 أوم / طور منسوبة الى الثانوي . اما المقاومة فيمكن اهمالها . يجهز هذا المحولان حملا نجمي الربط مقداره $500 + j1000$ أوم لكل طور .
احسب فولتية الطرف على الثانوي وزاوية طوره بالنسبة الى القوى الدافعة الكهربائية المحتثة في الثانوي . ووضح كيف سيتم حساب التيارات لكل محول على حدة .
(جامعة ليدز) (الجواب : 19,010 فولت ، $\angle -2^{\circ}\,15'$)

8. محولان ثلاثيا الطور B, A لهما نسب تحويل متساوية . الابتدائي والثانوي كلاهما مربوط على شكل نجمي ويعملان على التوازي لتجهيز حمل معين .
التيار الابتدائي للمحول A هو 100 أمبير وعامل قدرته متأخر 0·7 .
احسب التيار الابتدائي وعامل قدرة المحول B .
فولتية الخط للابتدائي هي 10 000 وقيم المقاومة الطورية والمفاعلة التسربية الطورية هي $R_A = 0{\cdot}5\,\Omega$, $X_A = 1{\cdot}5\,\Omega$, $R_B = 0{\cdot}6\,\Omega$ وكذلك $X_B = 1{\cdot}8\,\Omega$. منسوبة جميعها الى الابتدائي . وكلا المحولين له عدد لفات لكل طور في الثانوي تساوي ثلاثة امثال تلك التي للابتدائي .
احسب تيار الحمل وعامل القدرة . والمقاومة والمفاعلة لكل طور المكافئتين للحمل المربوط بشكل نجمي
(جامعة ليدز) (الجواب : 83·3 أمبير ، 0·7 متأخر . 61·1 أمبير . 0·71 متأخر . 188 Ω . 192 Ω)

9. محولان ثلاثيا الطور لهما نسبتا لفات متساوية . يجهزان على التوازي حمل مقداره 4 MW عند عامل قدرة متأخر 0·8 . والمعلومات عــن المحوليــن كالاتــي :

		المقاومة بنسبة الوحدة	المفاعلة بنسبة الوحدة
المحول	A	0·01	0·05
المحول	B	0·015	0·06

جد القدرة المركبة وعامل القدرة لكل محول

(جامعة لندن) (الجواب : 2154·6 – j 1692·2 kVA) 1845·4 – j 1307·8 kVA.
(0·818, 0·787

10. محولان متماثلان متغيرا المآخذ قدرة 500-kVA وفولتية 11 000/415 فولت . ثلاثيا – الطوركل منهما له ممانعة 0·02 + j 0·07 بنسبة الوحدة محسوبة على أساس اساس الـ MVA المقننة . ربطا على التوازي الى مصدر ثابت له فولتية 11 000 فولت وجهزا حملاً ثابت الممانعة مقداره **0·3/30°** أوم / طور مربوط بشكل نجمي على جهة الـ 415 فولت .

اذا كان احد المحولين على مأخذه الاسمي والاخر على + 5 ٪ . (لفات مخفضة من الفولتية العالية H.V) . فاحسب تيار ملف الفولتية العاليــة في المحول الاول (الذي على المآخذ الاسمي) وجد دخله بالواط والفولت أمبيرات المتفاعلة (vars) برهن المعادلات المستخدمة وافرض ان نسبة الممانعة المئوية للمحولين لاتعتمد على موقع المأخذ .

(L.C.T.) (الجواب: 0·878 j + 10·2 أمبير ، 194 kW ، 16·7 kVAr (متقدمة).

11. محولان ثلاثيا الطور A ، B نجميا الربط على جهتي الابتدائي والثانوي . كل منهما له عدد لفات في الثانوي تساوي ثلاثة امثال تلك التي للابتدائي . ربطــا على التوازي لتجهيز حمل مثلثي الربط مقاومته 270 أوم / طور ومفاعلته الحثية 135 أوم / طور . وكانت فولتية الابتدائي 11 ك.ف .

احسب تيار الثانوي للمحول A وعلاقته الطورية بتيار احد أطوار الحمل. تفاصيل المحولات كالاتي :

الملف	المقاومة (أوم)	المفاعلة التسربية (أوم)
الأبتدائي للمحول A	0·4	1·0
الأبتدائي للمحول B	0·4	0·8
الثانوي للمحول A	5·4	7·2
الثانوي للمحول B	3·6	10·8

(جامعة لندن) (الجواب : 90 أمبير يتأخر بزاوية مقدارها $25° 54'$) .

12· محولان ثلاثيا الطور / ربطاهما نجمي / نجمي . المفاعلة التسربية لكل منها 0·05 اوم / طور منسوبة الى جهة الثانوي . عندما يغذى أبتدائييهما على التوازي من مصدر بفولتية مقننة طبيعية تكون فولتيتا الطور للثانوي المناظرة في حالة الدائرة المفتوحة هما 230 فولت و232 فولت على التوالي . ربط ثانوياهما على التوازي الى حمل نجمي الربط متوازن له ممانعة 0·5 أوم / طور وعامل قدرة متاخر 0·9 :

أحسب
(أ) فولتية الطرف للحمل
(ب) الـ kVA المجهزة من قبل المحول الذي فولتيته الدائرة المفتوحة له هي 230 فولت .
أهمل تيار المغنطة والمفاقيد جميعاً .
(جامعة لندن) (الجواب : 226 فولت . 145 kVA) .

13· خازن محولات مثلثي / نجمي 6·6/0·44 ك.ف .متألف من ثلاث وحدات أحادية الطور متماثلة يجهز حملاً مقداره 120 kW بعامل قدرة أحادي بين الخط الأحمر R والمحايد وكذلك حملاً متوازناً مقداره 500 kVA بعامل قدرة متأخر 0·8 .
جد قيمة التيار في كل ملف ابتدائي وكل خط داخل . وعلم هذه القيم على مخطط مناسب للربط . تجاهل الهبوط الداخلي وتيار اللاحمل . تتابع الأطوار هو RYB (R ثم Y ثم B).
(جامعة لندن) (الجواب : تيارات الأبتدائي هي 25·3, 25·3 ، 41·2 أمبير).
(تيارات الخط هي 53 ، 62 ، 44 أمبير) .

14. تيار المغنطة في الملف الأبتدائي لمحول أحادي الطور غير محمل هو
$i = (0{\cdot}9\ \sin\ \omega t - 0{\cdot}4\ \ \sin\ 3\omega t)$ أمبير وكثافة الفيض في قلب المحول هي
$B = [1{\cdot}3 \sin(\omega t - 30^\circ) + 0{\cdot}2 \sin\ 3\omega t]$ تيسلاً. صافي المقطع العرضي للقلب
120 سم^2 . وتردد المركبة الأساسية هو 50 هرتز. والملف له 60 لفة .مقاومته ومفاعلته التسربية مهملتان .
على التوالي مع الملف الأبتدائي يوجد محاث هوائي القلب مقاومته 54·5 أوم وله محاثة 0·30 هنري . أشتق علاقة رياضية لفولتية المصدر . أحسب فقد الحديد في قلب المحول (مما يجدر ملاحظتـه ان التعبيرين الرياضيين لـكثافة الفيض B وللتيار i السالفين ليس المقصود بهما أن يمثلا الخواص B/H الحقيقية) .

(جامعة لندن) (الجواب : $(294 \cos(\omega t - 30^\circ) + 49{\cdot}1[\sin \omega t + 1{\cdot}73 \cos \omega t]$
$+22{\cdot}4 \cos 3\omega t - 21{\cdot}8 \sin 3\omega t$ فولت و 66 واط .)

15. محول ثلاثي الملف ملفاته مقننة كالآتي
الأبتدائي نجمي الربط 22 ك . ف 200 MVA
الثانوي نجمي الربط 275 ك . ف 200 MVA
الثالثي مثلثي الربط 3·3 ك . ف
فحوصات الدائرة القصيرة أعطت قيم الممانعات التسربية التالية وظهر أيضا ان المقاومات صغيرة بحيث يمكن أهمالها :
بأجراء القياسات على دائرة الأبتدائي مع كون

(أ) الثانوي مقصور الدائرة والثالثي مفتوحاً . كانت المفاعلة التسربية 0·24 اوم

(ب) الثالثي مقصور الدائرة والثانوي مفتوحاً : كانت المفاعلة التسربية 0·31 أوم

وباجراء القياسات في دائرة الثانوي مع جعل دائرة الابتدائي مفتوحة ودائرة الثالثي مقصورة كانت المفاعلة التسربية 54·3 أوم .
احسب ممانعات الدائرة المكافئة بنسبة الوحدة (أهمل تيار اللاحمل) منسوبة الى الـ MVA المقننة وفولتية الملف الابتدائي .
(الجواب : j 0·042 . j 0·057 وكذلك j 0·086 بنسبة الوحدة)

16· محولان ثلاثيا الطور ربطهما نجمي / نجمي مفاعلتاهما التسربية 0·005 أوم / طور طور و 0·004 أوم / طور على التوالي منسوبة الى جهة الثانوي . عندما يغـــذى ابتدائياهما على التوازي من مصدر مقنن الفولتية والتردد تكون فولتيتا الطـــور المناظرتين للثانوي في حالة الدائرة المفتوحة 235/0° . 233/0° على التوالي . عندما تكون الملفات الثانوية على التوازي وتجهز حملاً مثلثي الربط متوازناً ممانعته لكل طور 0·3 أوم وعامل قدرته متأخر 0·8 . احسب (أ) فولتية الطرف عند الحمل (ب) الـ kVA المجهزة من كل محول الى الحمل (جـ) الـ kVA الكلية المجهزة الى الحمل .

يمكن اهمال مفاقيد القدرة جميعاً وتيار المغنطة لـكلا المحولين .
علق على دقة النتائج المستحصلة .

(جامعة ليدز) (الجواب : 231 فولت. 1536 kVA , 776 kVA, 783 kVA)

17· محول نجمي / نجمي . ثلاثي الطور مقنناته 20-MVA . 66/22 ك.ف يحمل ملفاً ثالثياً مثلثي الربط مقنناته 5-MVA . 440 فولت . اشرح باختصار مزايا هذا الترتيب . جهز المحول حملاً ثلاثي الطور متوازناً مقداره 12 MVA عند فولتية 22 ك.ف وكذلك حملاً مقداره 2·5 MVA عند 440 فولت سوية مع حمل احادي الطور مقداره 2 MVA عند 12·7 ك.ف. عوامل قدرة الاحمال مقدارها واحد جميعاً .

جد مقدار التيار في كل ملف من المحول باهمال المفاقيد حميعها والفيض المتسرب وكذلك تيار المغنطة .

(جامعة لندن) (الجواب : 162 ,136·5 ,136·5 : 472·5 ,315 ,315 : 2970 ,2970 ,380 أمبير) .

الفَصلُ السّابعُ

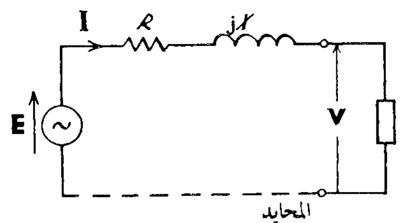
المكائن التزامنية في منظومات القدرة

SYNCHRONOUS MACHINES IN POWER SYSTEMS

7.1 مقدمــة

ان اشتغال ماكنة تزامنية منفردة بحد ذاتها مسألة معروفة وقد تعاملت مع هذا المضمار كتب دراسية ومصدرية كثيرة في مجال المكائن الكهربائية . من الضروري هنا اعادة النظر في بعض الحقائق الاساسية التي تم ذكرها في هذه الكتب بالتفصيل قبل الشروع بدراسة المكائن الترامنية بوصفها جزء من منظومة قدرة .

عند تحليل منظومة قدرة فمن المعتاد ان تمثل الماكنة التزامنية بدائرة مكافئة بسيطة موضحة في الشكل 7.1 (انظر الفقرة 1.2) . لمولد تزامني ذي ثلاثة اطواد يولــد فولتيات متزنة ومحمل بحمل متوازن . يمكن الاخذ بنظر الاعتبار ج.م.ت القوة الدافعة الـكهربائية المتولدة ضمن طور واحد . وكذلك المقاومة R والمفاعلة X لطور واحد فقط ايضاً . ويمثل ج.م.ت فولتية الطرف للطور (خط واحد مع المحايد) $\mathbf{V}$ بالمعادلة $\mathbf{V} = \mathbf{E} - \mathbf{IZ}$. حيث $\mathbf{I}$ هوج.م.ت تيار الطور والممانعة $\mathbf{Z} = R + jX$.



الشكل 7.1 : الدائرة المكافئة التقريبية لطور واحد لماكنة تزامنية ذات ثلاثة أطوار بدوار اسطواني تحت ظروف متزنة .

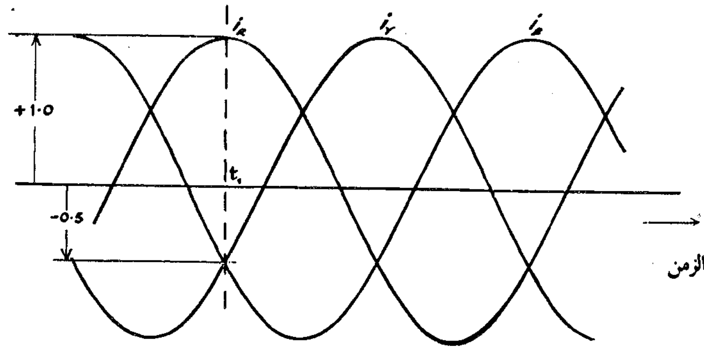
هذه الدائرة المكافئة البسيطة لها . على أي حال . تحديدات كثيرة . فاذا مـا اشتغلت ماكنة ذات دوار اسطواني في الحالة المستقرة بدون أي تشبع فان X يمكـن كتابتها X_s المفاعلة التزامنية وستكون هذه ثابتة . زيادة التشبع تؤدي الى تقليل المفاعلة المؤثرة . وتتغير قيمة المفاعلة المؤثرة تحت الظروف العابرة . حيث ان ازدياد قيمتها من قيمة ابتدائية قليلة في حالة حصول عطل قصر الدورة الى X_s بعد ما تصل الى الحالة المستقرة ستناقش في الفقرة 7.5 .

للماكنة ذات الاقطاب البارزة لا تعطى الدائرة المكافئة الموضحة في الشكل 7.1 نتائج مرضية ومضبوطة دائماً . وفي هذه الحالة يجب الاخذ بنظر الاعتبار الفرق بين المحورين المغناطيسيين للماكنة . على هذا الاساس يجب فصل التيار I والمفاعلة X الى مركبتين تكون كل واحدة منهما على محور . ان هذا الموضوع ستتم مناقشته في الفقرة 7.4 باسلوب مختصر .

7.2 اشتغال منوب غير مشبع منفرد ذي دوار اسطواني في الحالة المستقرة

Steady-state Operation of a Single Unsaturated Cylindricalrotor Alternator

باهمال التوافقيات المتولدة في الجزء الساكن (المنتج) لمنوب ذي دوار اسطواني وكذلك في الجزء الدوار (المجال) نتيجة التوزيع الفراغي للقوة الدافعة المغناطيسية . يمكن في هذه الحالة تمثيل القوى الدافعة المغناطيسية بشكل اتجاهي . وهذا طبيعي لكون المركبة الاساسية الجيبية هي التي ستبقى لكي تؤخذ بنظر الاعتبار فقط .

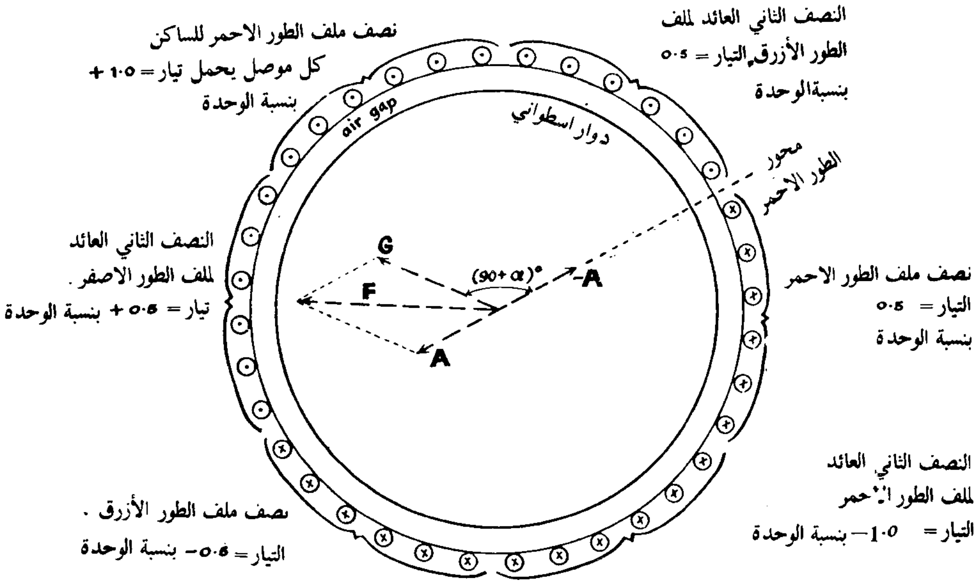


الشكل 7.2 القيم اللحظية للتيار في ساكن ذي ثلاثة اطوار

ان هذه القوى الدافعة المغناطيسية تدور بسرعة تزامنيــة ثابتة ولها مقدار ثابـــت لمجال ثابت وتيارات ثابتة في الجزء الساكن من المولد .

عند اللحظة الزمنية t_1 في الشكل 7.2 ، تكون ال ق . د . مغ لرد فعل منتج الساكن A – منطبقة على محور الطور الاحمر . هذا لان ذلك الطور يحمل اقصي تيار في تلك اللحظة من الزمن . هذا موضح في الشكل 7.3 . حيث أخذت ماكنة ذات قطبيـن للسهولة . ان اتساع القوة الدافعة المغناطيسية الجيبية A يتناسب طردياً مع . ج . م . ت تيار الساكن I . يلاحظ هنا أنه من المناسب التعامل مع اتساع ال ق . د . مغ بدلاً مـن قيمة ج . م . ت . لها وهذا سوف يوضح عند التبصر بقيمة F . وتستخدم الحـــروف الطباعية الكبيرة للقوى الدافعة المغناطيسية هذه لان لها توزيعاً فراغياً جيبـي الشكــل ولكونها أيضاً ليست على محور واحد بصورة طبيعية . ان الاشارة السالبة لرد فعل المنتج عند عامل قدرة متأخر هي فقط للاستفادة لكي تكون مركبة مجال ال ق . د . مغ المعادلة لها موجبة .

عند مرور تيارات متوازنة في الاطوار الثلاثة للمنوب ، يوضح المخطط الطوري في الشكل 7.4 بان هناك ق . د . ك . E ستتولد فعلاً في موصلات طور واحد للمنوب . وهذه تختلف عن فولتية الطرف V بسبب مقاومة موصلات طور الساكن R والمفاعلة التسربية X_L الناتجة بسبب ذلك الجزء من فيض الساكن الذي لا يمر خلال الدائرة المغناطيسية الرئيسية . ولذا لا يتشابك مع ملفات المجال . ويتشابك الفيض المتسرب مع موصلات الساكن بصورة رئيسية عند اطراف الملفات وحول الاخاديد . ولأن مسارات هذا الفيض



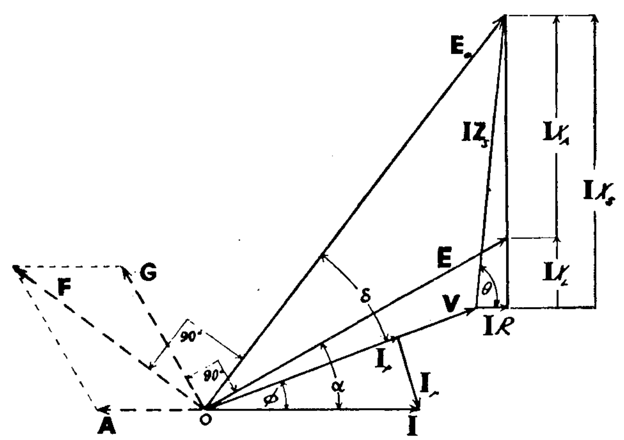
الشكل 7.3 توزيع التيار في ملفات ساكن ذي ثلاثة اطوار وقطبين والمتجهات الفراغية للقوة الدافعة المغناطيسية في اللحظة الزمنية t_1 الموضحة في الشكل 7.2

المتسرب تكون جميعها أو جزء منها في الهواء . فان X_L تكون ثابتة لأي ماكنة . في الظروف الطبيعية لعامل قدرة متأخر فان E تسبق فولتية الطرف V بزاوية صغيرة . وتكون أكبر منها بقيمة قليلة . ذلك لان X_L لمنوب توربيني ذي قطبين تتراوح قيمتها بين 0.1 و0.2 بنسبة الوحدة (وهذا يعني في التحميل الكلي يكون التيار $IX_L/V = 0.1$ الى 0.2) .

يوضح الشكل 7.4 أنه في اللحظة التي عندها يكون تيار الطور الاحمر I بقيمته القصوى تكون القيمة الآنية للقوة الدافعة الكهربائية المتولدة في ملفات الطور $\sqrt{2}$ E cos α . وفي الفترة عند اللحظة التي تولدت فيها ذروة الـ ق . د . ك في الموصل المركزي لنطاق الطور الاحمر . في هذه الحالة يجب ان تكون محصلة الفيض ومحصلة الـ ق . د .مغ G (التي تولد E) في الفجوة الهوائية قد دارت على هذا الموصل بزاوية فراغية نصف قطرية مقدارها α (أو زاوية فراغية α/p نصف قطرية لماكنة ذات عدد أقطاب $2p$) . محصلة الـ ق . د . مغ G المتولدة هذه يمكن في هذه الحالة توضيحها في الشكل 7.3 متقدمة على المتجه الفراغي A− بزاوية $(\alpha+\pi/2)$

درجة نصف قطرية . واتساع القوة الدافعة المغناطيسية F للمجال المسلط / القطب (وهذا يساوي $I_f N_f$. حيث I_f هو التيار المستمر للمجال و N_f عدد اللفات بالقطب الواحد على الجزء الدوار) يكون

$$F = A + G.$$



الشكل 7.4 . المخطط الطوري الفراغي للفولتية والتيار والقوة الدافعة المغناطيسية لمنوب غير مشبع ذي دوار اسطواني

V = فولتية الطرف للطور

I = تيار طور الساكن

$\cos\phi$ = عامل قدرة الحمل

IR = هبوط الفولتية بسبب مقاومة طور الساكن

IX_L = هبوط الفولتية بسبب المفاعلة التسربية لطور الساكن

IX_S = هبوط الفولتية بسبب المفاعلة التزامنية لطور الساكن

$\tan^{-1} X_S/R = \theta$

يجب ان تقع F على خط المركز للقطب الدوار (المحور المباشر) ومواقع A و G تتغير مع عامل القدرة للحمل كما سيوضح في ادناه .

بما ان القوى الدافعة المغناطيسية الفراغية هذه تدور بسرعة تزامنية تحت ظروف الحالة المستقرة فانه من المسموح به (حتى لو ان F ناتجة بسبب تيار مباشر d.c.) ان توضح هذه المتجهات الفراغية لل ق . د . مغ ضمنيا في مخطط واحد مع المطاورات الزمنية للفولتية والتيار . هذا ماهو منفذ في الشكل 7.4 . باختيار كيفي لجعل ال ق . د . مغ لرد فعل المنتج A — على الخط نفسه مع التيار I الذي ينتجه . وهذا

يعطي وضعا لايمكن نسيانه بوجود زاوية قائمة بين محصلة القوة الدافعة المغناطيسية G المتولدة في الفجوة الفراغية والقوة الدافعة الكهربائية E المتولدة عنها . لكن ليس هناك اهمية فيزياوية لهذه الزاوية .

اذ ا اهمل التشبع في الدائرة المغناطيسية . تتناسب القوة الدافعة الكهربائية مع القوة الدافعة المغناطيسية . وعليه ستكون هناك ق . د . ك E_o بحيث تكون $E_o/F = E/G$ (وتعبر F هنا عن مقدار ل F بديلا عن كتابة $|F|$) . اما E_o فهي ال ق . د . ك للدائرة المفتوحة التي ستظهر في الحالة المستقرة بعد تقليل تيار الحمل I الى الصفر . مع ابقاء I_f بالقيمة نفسها . وهذا يعني ثبوت F . ان E_o تظهر ايضا خلف ال ق . د . مع F المناظرة لها بزاوية مقدارها 90° .

ان الزوايا القائمة المحصورة بين E_o و F وبين E و G هي اعتباطية بكل ماللكلمة من معنى وليست لها اهمية فيزياوية اطلاقا ، وهذا لكون ` و E مطاورتين (متغيرتان مع الزمن) ولكن F و G هما متجهان فراغيان . لهذا يجب عدم الالتباس مع زاوية ال 90° الطورية بين اي ق . د . ك محتثة في ملف وبين الفيض الذي يكون ثابتاً على محور الملف وبقيمة تتغير جيبيا مع الزمن . كما هو الحال في المحول على سبيل المثال .

اذا اهمل التشبع والتوافقيات في ماكنة ذات دوار اسطواني . فانه يمكن البرهنة بوساطة مثلثات مشابهة لتلك التي في الشكل 7.4 بان رأس السهم الذي يمثل المطاور E_o يجب ان يقع على IX_L ذلك لان المطاور الذي يصل بين E و E_o يجب ان يتأخر بزاوية قدرها 90° عن A . في الحالة المستقرة والمتوازنة لاشتغال ماكنة غير مشبعة ذات دوار اسطواني . يتم تمثيل تأثير رد فعل المنتج ضمن الماكنة وعلى الدائرة بصورة تقريبية بوساطة مفاعلة خيالية للمنتج X_A . ان مجموع X_A و X_L يسمى المفاعلة التزامنية X_s . حيث $X_s \gg X_L$. وتتراوح قيم X_s بين 1·5 الى 2·0 بنسبة الوحدة للمولدات التوربينية الكبيرة ذات القطبين . وللمنوبات ذات السرع الواطئة تتراوح X_s بين 0·5 الى 1 بنسبة الوحدة . الممانعة المؤثرة طور للساكن تحت ظروف الحالة المستقرة تكون على هذا الاساس $Z_s = R + jX_s$. وتعرف Z_s بالممانعة التزامنية .

لما كانت الفولتية IR حوالي 0·01 بنسبة الوحدة لذلك يمكن اهمال

قيمتها بالمقارنة مع IX_s لبعض الاغراض . اذا اعيد رسم الشكل 7.4 لقيم $R = 0$ و $\phi = 90°$ متأخرة فسوف نلاحظ ان V, E وكذلك E_o تكون جميعها في الطور نفسه وتتقدم I بزاوية 90° . اما القوة الدافعة المغناطيسية لرد فعل المنتج A– فتكون في هذه الحالة معاكسة بصورة مباشرة الى ق . د . مغ للمجال F . ولذلك ستكون باتجاه المحور المباشر (خط المركز لقطب الدوار) . ان القوة الدافعة المغناطيسية للمجال F يمكن استخراجها بجمع G مع A جبرياً كونهما على المحور المباشر نفسه . وعليه تكون F كبيرة نسبياً . هذه الحالات تحدث في حالة الفحص بطريقة عامل القدرة الصفري المتاخر الذي يتم اجراؤه على المكائن التزامنية لمعرفة البيانات التي اذا ماتمت معرفتها مع نتائج اخرى نتمكن من ايجاد المركبتين X_A و X_L للمفاعلة التزامنية X_s .

بالاسلوب نفسه اذا كانت $R = 0$ و $\phi = 90$ متقدما فعليه تكون كل من V . E وكذلك E_o مرة اخرى في الطور نفسه وتتأخر عن I بزاوية 90° . الق . د . مغ لرد فعل المنتج A – تكون ايضا على المحور المباشر ولكنهافي هذه الحالة تساند الق .د مغ للدوار وهي $F = G - A$. ان F هي الان صغيرة نسبياً عند اشتغال الماكنة بالفولتية المقننة V . ولما كان العزم والقدرة اللذان تخرج عندهما الماكنة التزامنية عن حالة التزامن يتناسب كل منهما مع E_o التي تعتمد بدورها على F (أنظر الفقرة 7·7) وتبعاً لذلك قد تتأثر استقرارية المنظومة سلبيا بتشغيل المكائن عند عوامل قدرة متقدمة قليلاً نسبياً . الا اذا استخدمت منظمات فولتية خاصة لهذا الغرض (الفقرة 7·9) .

وباعادة رسم الشكل 7.4 , يمكن ايضاً البرهنة على انه اذا كان I في طور E_o نفسه . فان المركبة الاساسية لموجة القوة الدافعة المغناطيسية لرد فعل المنتج A– ستكون على المحور العمودي بحيث ان فيض الفجوة الفراغيةسوف ينحرف عن المحور المباشر . لذلك وبصورة عامة فان رد فعل المنتج عند اي عامل قدرة وتيار يؤدي الى انحراف الق . د . مغ للفجوة الهوائية G عن المحور المباشربزاوية تكون ثابتة في كل الاوقات لحالة التحميل المعطاة . كذلك يسبب اختلافا في مقدارها عن الق.د. مغ F للفجوة الهوائية .

مثال محلول *7.1*

منوب ثلاثي الطور بدوار اسطواني قدرته 1000-kVA وفولتيته 6·6 ك . ف نجمي الربط له مميزات الدائرة المفتوحة ومميزات الدائرة القصيرة كما موضحة

في الجدول الاتي

تيار المجال . أمبير	0	25	50	75	100	150	200
فولتية الطور خلال الدائرة المفتوحة . فولت	0	1200	2400	3450	4000	4500	4700
تيار الدائرة القصيرة . أمبير	0	40	80	—	—	—	-

افرض ان مميزات الدائرة المفتوحة منطبقة مع « خط الفجوة الهوائيـة » (هذا يعني اهمال التشبع) . احسب

(أ) المفاعلة التزامنية طور

(ب) فولتية الدائرة المفتوحة عند تيار الاثارة اللازم لخرج الحمل الـكلـي بعامـــل قدرة متأخر 0·8 .

استخدم مميزات الدائرة المفتوحة الحقيقية . احسب تيار المجال في الحمل الـكلي وعامل قدرة متأخر 0·8 مع العلم ان مقاومة الساكن تكون مهملة والمفاعلة التسربيـــة طور هي 3 أوم

(جامعة لندن)

الحل : بالتدقيق في الجدول نرى ان « خط الفجوة الهوائية » يمتد للأعلى الى 50 أمبير لتيار الأثارة لأن منحنى الدائرة المفتوحة يكون خطياً في هذا المدى . لذلك تكون $X_s = 1200/40 = 30$ أوم طور .

في حالة الحمل الـكلي يكون تيار الساكن

$$I = \frac{1000 \times 10^3}{\sqrt{3} \times 6600} = 87{\cdot}5\ \text{A}$$

والفولتية $V = 6600/\sqrt{3} = 3810$ فولت / طور

بصورة عامة . من الشكل 7.4 .

$$E_o^2 = (V\cos\phi + IR)^2 + (V\sin\phi + IX_s)^2$$

ويهمل IR لصغر قيمته بالمقارنة مع IX_s

$$E_o^2 = (3810 \times 0{\cdot}8)^2 + (3810 \times 0{\cdot}6 + 87{\cdot}5 \times 30)^2$$

ومنها $E_o = 5780$ فولت .

عليه تكون فولتية الدائرة المفتوحة بين أطراف الخطوط هي $5780 \times \sqrt{3} = 10\,000$ فولت .

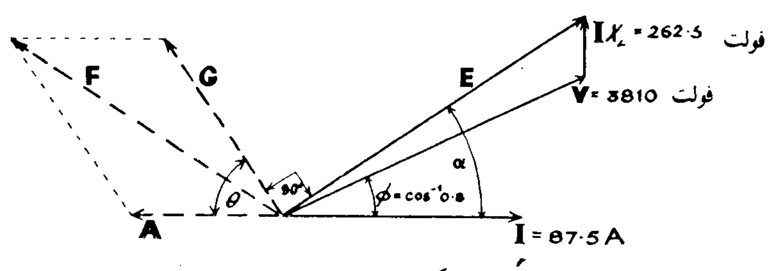
بطريقة أخرى يمكن ايجاد الحل بدون أستخدام المخطط الطوري بكتابة

$$\mathbf{E}_o = \mathbf{V} + \mathbf{I}X_s = 3810/0^\circ + 87{\cdot}5/-36^\circ\ 52' \times 30/90^\circ$$

وهذا يعطي الزاوية بين $\mathbf{E}_o$ و $\mathbf{V}$ مباشرة .

ان القوة الدافعة الكهربائية **E** المحتثة لكل طور هي في الحقيقة « القوة الدافعة الكهربائية خلف المفاعلة التسربية » وهذه تنتج عن محصلة تيار المجال (أو ال ق . د . مغ . **G**)

من الشكل 7.5 .

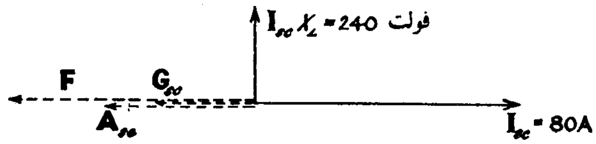


الشكل 7.5

$$|\mathbf{E}| = [(V\cos\phi)^2 + (V\sin\phi + IX_L)^2]^{\frac{1}{2}}$$

$$= [(3810 \times 0{\cdot}8)^2 + (3810 \times 0{\cdot}6 + 87{\cdot}5 \times 3)^2]^{\frac{1}{2}} = 3970 \quad \text{فولت}$$

ومن منحنى الدائرة المفتوحة . تحتث فولتية مقدارها 3970 بتيار مجال قدره 97 أمبيراً. يمكن قياس **G** مقدرة بتيارات المجال اذا قدرت **F** بتيارات المجال بدلا من أمبير لفة/ قطب . ولهذا تكون 97 أمبيرا في هذه الحالة .



الشكل 7.6

ان تيار الساكن وقيمته 87·5 أمبيراً ينشيء رد فعل للمنتج الذي يحتاج الى A أمبيرات مجال لـكي تعادله . ويمكن ايجاد قيمة A من أعتبار فحص الدائرة القصيرة . ان قسماً من تيار المجال G_{sc} يجب أن ينشيء فيضاً في الفجوة الهوائية الذي بدوره يولد ق. د. ك مقدارها $I_{sc}X_L$. لتيار دائرة قصيرة I_{sc} . قل 80 أمبيراً . تكون $I_{sc}X_L$ = 240 فولت. ومن منحني الدائرة المفتوحة . G_{sc} يجب أن تكون 5 أمبيرات لـكي تولد ق. د. ك مقدارها 240 فولتاً . ان تيار المجال الـكلي الذي هو 50 أمبيراً لتيار دائرة قصيرة مقداره 80 أمبيراً . يجب أن يكون مجموع مركبات رد فعل المنتج لتيار المجال A_{sc} و G_{sc} . ان A_{sc} لتيار ساكن (80 أمبير) يجب أن تكون 50 − 5 = 45 أمبيراً لأن الشكل 7.6 يوضح حقيقة أنه في حالة الدائرة القصيرة لملف الساكن ذي المقاومة المهملة. تعمل جميع القوى الدافعة المغناطيسية على المحور نفسه ولذلك فأنها يمكن أن تضاف او تطرح جبرياً .

على هذا الاساس فان لتيار قيمته 87·5 أمبير يمر في الساكن . هناك مركبة لتيار المجال قدرها $87{\cdot}5/80 \times 45 = 49{\cdot}2$ أمبير نحتاجها لمعادلة رد فعل المنتج .

ان التيار الـكلي للمجال F يمكن ايجاده باضافة A الى G اتجاهياً وكما موضح في الشكل 7.5

من الشكل 7.5

$$F^2 = G^2 + A^2 + 2GA\cos\theta$$

$$\cos\theta = \sin\alpha = \frac{(3810 \times 0{\cdot}6 + 262{\cdot}5)}{3970} = 0{\cdot}6428$$

$$F = [97^2 + 49{\cdot}2^2 + 2 \times 97 \times 49{\cdot}2 \times 0{\cdot}6428]^{\frac{1}{2}}$$

$$= 133{\cdot}9 \text{ A.}$$

عليه يتطلب تيار مجال مقداره 133.9 أمبير لاعطاء خرج الحمل الكلي بعامل قدرة متأخر 0.8 .

7.3 المفاعلة التزامنية ونسبة القصر في الدائرة

Synchronous Impedance and Short-circuit Ratio

اذا حدث قصر دائرة متماثل ثلاثي الطور على اطراف منوب ذي ثلاثة اطوار . فعند الوصول الى الحالة المستقرة فان E_o . الق.د.ك المتولدة في كل طور في حالة الدائرة المفتوحة . يمكن اعتبارها ممتصة باجمعها لامرار تيار دوار I_{sc} خلال الممانعة التزامنية Z_s لذلك ولاي تيار مجال معلوم في الشكل 7.7 فان الق.د.ك بنسبة الوحدة في حالة الدائرة المفتوحة يمكن تقسيمها بالنسبة الى قيمة تيار الدائرة القصيرة بنسبة الوحدة لايجاد المفاعلة التزامنية بنسبة الوحدة ايضاً . واذا ماعبر عن الق.د.ك بالفولت والتيار بالامبير فان

$$Z_s = E_o/I_{sc}\,\Omega.$$

وهذه تعرف احيانا بالقيمة المشبعة للممانعة التزامنية وسبب ذلك هو انه مع كونها تعتبر ثابتة في حالات الاثارة الواطئة . تنخفض قيمتها اذا مازاد تيار المجال وحصلت حالة التشبع . اذا ماتم تقسيم I_{sc} الى ق.د.ك معرفة بالجزء الخطي لمنحنى الدائرة المفتوحة والذي قد ينتج كما موضح في الخطوط المنقطة في الشكل 7.7 حيث يعرف بخط الفجوة الهوائية . فعندها يمكن ايجاد قيمة الممانعة التزامنية غير المشبعة .

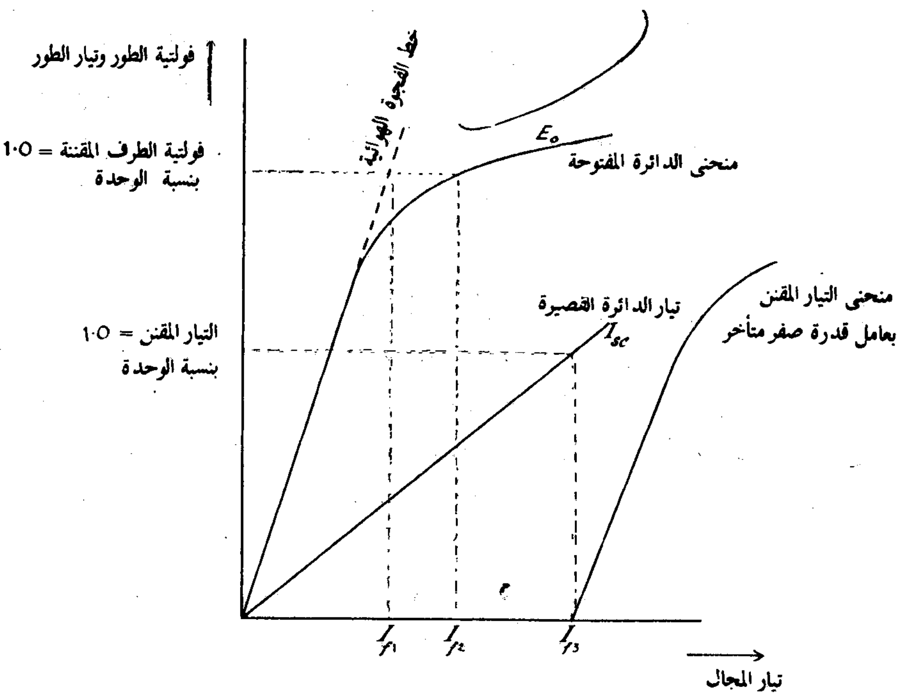
اذا اشتغلت الماكنة بالتردد المقنن وجهزت التيار المقنن لحمل يجعل عامل القدرة مقتربا من الصفر متأخرا . فعندها يسبب التغير في تيار المجال تغيرا في فولتية الطرف كما موضح في الشكل 7.7 . ان قيمة تيار المجال I_{f3} الذي تكون عنده قيمة فولتية الطرف صفراً . في فحص عامل القدرة الصفري (z.p.f.) هذا . سوف تكون نظرياً القيمة اللازمة نفسها لامرار تيار مقنن في حالة فحص الدائرة القصيرة التي يكون فيها عامل القدرة مساويا الى الصفر تقريبا .

لما كان تيار الدائرة القصيرة يتناسب طرديا مع تيار المجال . فان تيار قصر الدورة عند تيار المجال I_{f1} . والذي يولد فولتية قدرها 1 بنسبة الوحدة على خط الفجوة الهوائية . هو $1{\cdot}0 \times I_{f1}/I_{f3}$. عليه تكون قيمة الممانعة التزامنية غير المشبعة بنسبة الوحدة $1{\cdot}0 \div (I_{f1}/I_{f3}) = I_{f3}/I_{f1}$

ان نسبة القصر في الدائرة (S.C.R) هي مقياس نسبي لشدة مجال (الدوار) الى أمبير- لفات الساكن. عليه فهي نسبة تيار المجال الذي يعطي فولتية مقننة لطور واحد في الساكن في حالة الدائرة المفتوحة الى تيار المجال الذي يعطي تيار الساكن المقنن في حالة الدائرة القصيرة .

نسبة القصر في الدائرة (غير المشبعة) = I_{f1}/I_{f3}

عليه فأن نسبة القصر في الدائرة غير المشبعة هي مقلوب الممانعة التزامنية غير المشبعة معبراً عنها بنظام نسبة الوحدة .



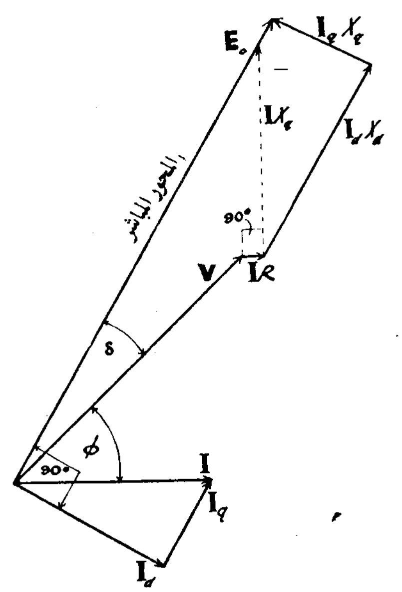
الشكل 7.7 : ا ق . د . ث للطور في حالة الدائرة المفتوحة . تيار طور الدائرة القصيرة وفولتية الطرف للطور بتيار مقنن بعامل قدرة صفري متأخر . بوصفه دالة لتيار المجال

أما نسبة القصر في الدائرة المشبعة فتساوي I_{f2}/I_{f3} . وهذه القيمة يشار اليها عادة بـ S.C.R . هذه لاتساوي بالضبط مقلوب وحدة الممانعة التزامنية . حيث ان الأخيرة قد لاتكون ثابتة قطعياً . مع أنه في حالة حسابات منظومة القدرة تفرض قيمة فعالة ثابتة لها بصورة عامة . لمنوبات توربينية كبيرة ذات قطبين تكون قيمة الممانعة التزامنية حوالي 2 بنسبة الوحدة ونسبة القصر في الدائرة S.C.R حوالي 0.5 .

7.4 نظرية المحورين لمنوب بارز القطب

Two-axis Theory of a Salient-pole Alternator

لماكنة ذات دوار اسطواني تكون المنافذة لحزمة جزئية من الفيض عابرة للفجوة الهوائيـة ثابتة تقريباً للأوضاع الزاوية للدوار جميعاً . وعليه تكون الـ ق . د . مغ المبينة في الشكل 7.4 متناسبة طردياً مع فيض الفجوة الهوائية اذا ماأهمل التشبع الحاصل في الأجزاء الحديدية للدائرة المغناطيسية .



الشكل 7.8 المخطط الطوري للمحورين المتعامدين .

على أية حال . ففي الماكنة ذات الأقطاب البارزة تتغير المنافذة بالنسبة الى حزمة جزئية من الفيض من قيمة قصوى $\mathscr{P}_d$ (والتي قد تكون مساوية لتلك التي في الماكنة الأسطوانية) على المحور المباشر . الى قيمة دنيا $\mathscr{P}_q$ على المحور التعامدي (محور الأقطاب البينية) حيث يكمن أطول مسارهوائي في الفراغ بين الأقطاب البينية . تعمل الـ ق . د . مغ F فقط على طول المحور المباشرولكن . وكما أشير اليه في الفقرة 7.2 . فأن الـ ق . د . مغ لرد فعل المنتج A– . مع أنها تدور تزامنياً مع الـ ق . د . مغ للدوار F . الا أنها تتغير تبعاً للوضع الزاوي بالنسبة اليها بموجب عامل القدرة . وبصورة عامة ولأن المركبة

الأساسية هي المأخوذة فقط بنظر الأعتبار . فأن الـ ق . د . مغ لرد فعل المنتج يمكن تحليلها الى مركبتين على محورين يفترقان بزاوية كهربائية مقدارها 90° . حيث تكون احدى هاتين المركبتين A_d– على المحور المباشر والأخرى A_q– على المحور التعامدي . هاتان المركبتان ينظر اليهما على انهما منتجتان بوساطة مركبتي التيار $\mathbf{I}$ وهما $\mathbf{I}_d$ و $\mathbf{I}_q$ المبينة جميعاً في الشكل 7.8 . ولأن $\mathscr{P}_d > \mathscr{P}_q$. تكون القيمة الفعالة للمفاعلة التزامنية على المحور التعامدي X_q أقل من قيمة تلك التي على المحور المباشر X_d .

لمنوب بارز الأقطاب له X_d حوالي 0·9 بنسبة الوحدة . تكون X_q ثلثي هذه القيمة تقريباً . بينما للمكائن ذات الدوار الأسطواني مثل المنوبات التوربينية ذات القطبين تكون X_d بحدود 1·5 الى 2·0 بنسبة الوحدة . وتكون X_q حوالي 5 – 10 % (من 1·5 بنسبة الوحدة) أقل من هذه القيمة نتيجة لأخاديد الدوار . مما يجب ملاحظته ان $\mathbf{I}_d$ هو تيار متأخر غير فعال بالنسبة الى $\mathbf{E}_o$. وينشيء تأثيراً لرد فعل المنتج ضمن $\mathbf{I}_d X_d$ وبتقدم على $\mathbf{I}_d$ بزاوية مقدارها 90° . وبذلك يحدث تأثيراً على المحور المباشر . ان X_d و X_q كليهما يتضمن المفاعلة التسربية X_L والتي فرضت متساوية في كليهما (لغرض رسم الشكل 7.8 من المفيد معرفة ان المطاور $\mathbf{I}X_q$ المرسوم من نهاية المطاور $\mathbf{I}R$ ينتهي في نقطة على المطاور $\mathbf{E}_o$) .

7.5 الظروف العابرة Transient Conditions

بصورة عامة . اذا كان عطل الدائرة القصيرة قريباً جداً من أطراف المنوب فأن تيار الطور الذي يتم الحصول عليه بالراسم الذبذبي سيكون كما موضح في الشكل 7.9 . وهذا يبين ان التيار يحتوي على

(أ) مركبة للتيار المستمر d.c. التي تتضاءل بصورة اسية بالتقريب .

(ب) مركبة متناوبة تتضاءل مع الزمن وتصل الى قيمة حالة الأستقرار.

وتنشأ مركبة التيار المستمر من حقيقة أنه اذا سلط مصدر للفولتية $e = E_m \sin(\omega t + \alpha)$ في لحظة زمن $t = 0$ لدائرة تحتوي على مقاومة بالاوم ومحاثة L بالهنري مربوطتين على التوالي . فالتيار المار هو مجموع المركبة المتناوبة للحالة المستقرة (حل التكامل الخاص) والمركبة العابرة ذات الأتجاه الواحد (الدالة التكميلية)

التي تتلاشى بصورة اسية بثابت زمن مقداره $T = L/R$ ثانية. ان هذه المركبة يمكن أن تكون قيمتها صفراً في لحظة معينة على موجة الفولتية عند ايصال الدائرة. أما التيار فيأخذ شكل المعادلة التالية

$$i = (E_m/Z)\sin(\omega t+\alpha-\phi)+K\,e^{-Rt/L}$$

حيث ان

$$Z = \sqrt{(R^2+\omega^2L^2)}$$

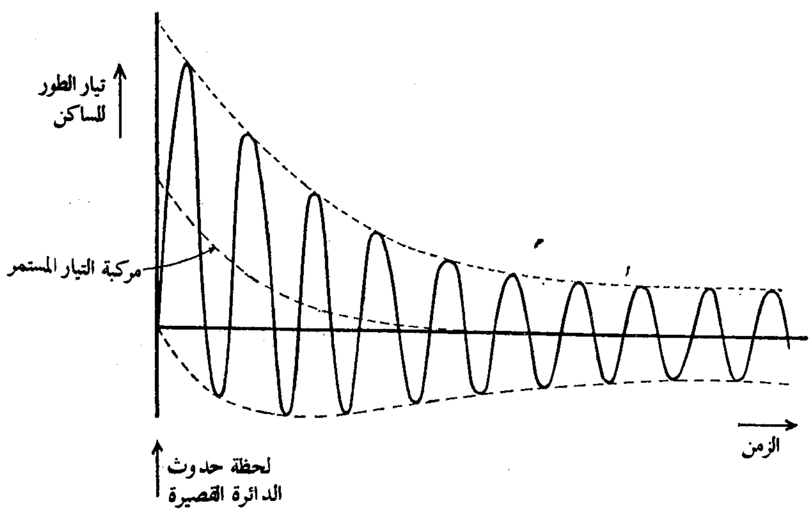
وكذلك

$$\phi = \tan^{-1}\omega L/R.$$

لتيار مقداره صفراً عند لحظة $t = 0$

$$K = -(E_m/Z)\sin(\alpha-\phi).$$

ان مركبة التيار المستمر سوف تؤول الى الصفر في حالة ما اذا كانت $\alpha-\phi = 0$ أو π بالدرجات نصف القطرية فقط. بالاسلوب نفسه سوف تكون لمركبة التيار المستمر قيمة



الشكل 7.9 تيار الدائرة القصيرة للمنوب

قصوى ابتدائية مقدارها E_m/Z – والتي تمثل قيمة الذروة للمركبة المتناوبة عندما تغلق الدائرة بزاوية ($\alpha-\phi$) = $\pm\pi/2$ درجة نصف قطرية. فاذا كانت $\omega L \gg R$ تكون $\phi \simeq \pi/2$ درجة نصف قطرية. بحيث ان غلق الدائرة عند اقصى قيمة للفولتية

سوف لايعطي مركبة التيار المستمر . وعليه فان غلق الدائرة عندما تكون الفولتية صفراً سوف يؤدي الى سريان اعظم قيمة للتيار المستمر العابر .

ان هذا يوضح سبب ظهور مركبة التيار المستمر في الرسم الذبذبي في تيار الساكن لمنوب غير محمل متعرض الى عطل الدائرة القصيرة على اطواره الثلاثة كلها بالصورة المبينة في الشكل 7.9 . لما كانت فولتيات الاطوار الثلاثة مفترقة عن بعضها بزاوية $2\pi/3$ درجة نصف قطرية . فان كميات مركبات التيار المستمر في تيارات الاطوار الثلاثة في أي فحص أو عطل سوف تكون مختلفة عن بعضها بصورة عامة . وستتغير من فحص معين أو خطأ معين الى آخر الا اذا تمت السيطرة على نقطة الغلق للدائرة ضمنياً خلال الموجة .

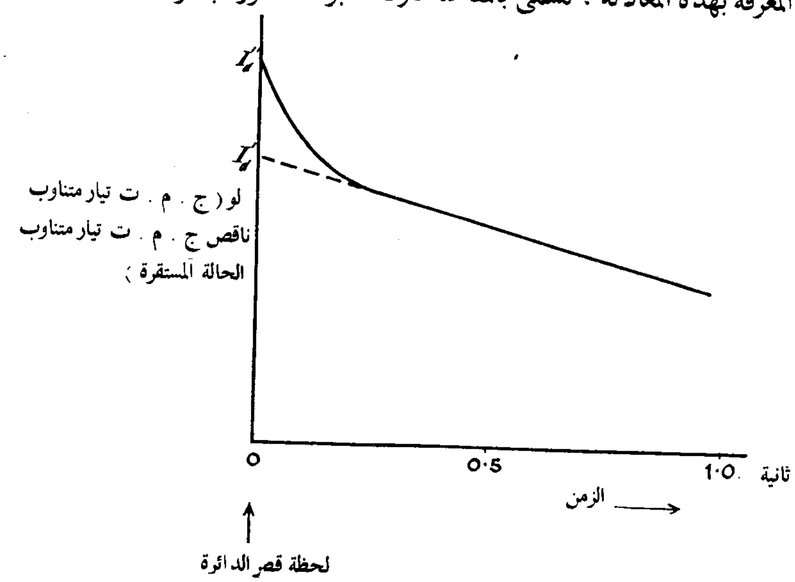
ان حقيقة هبوط قيمة المركبة المتناوبة . الى ان تصل للحالة المستقرة كما موضحة في الشكل 7.9 . تكمن بسبب زيادة المفاعلة الحثية للماكنة التزامنية الفعالة من قيمة واطئة نسبياً في البداية في لحظة حدوث الدائرة القصيرة حتى تصل الى قيمتها في الحالة المستقرة . قيمة الحالة المستقرة هذه تؤخذ عموماً بالمفاعلة X_a وهي المفاعلة التزامنية للمحور المباشر . والسبب في ذلك هو أنه في حالة الدائرة القصيرة تكون مفاعلـة الدائرة اكبر بكثير من المقاومة . بحيث يتأخر تيار الساكن بزاوية نصف قطرية قدرها $\pi/2$ تقريباً خلف الفولتية الدافعة . وعليه تتمركز الـ ق . د . فع لرد فعل المنتج المتكونة في الحالة المستقرة كلياً على المحور المباشر .

بالاسلوب نفسه خلال الفترة التي تتغير فيها مفاعلة الماكنة . تؤخذ القيم على اساس الكميات في المحور المباشر . من الممكن في بعض الحالات . ان يكون عامل قدرة العطل فوق قيمة الصفر بقليل . على سبيل المثال . في المنظومات المؤرضة بمقاومة خلال عطل تاريضي . بحيث لايكون رد الفعل في الماكنة كله بالضرورة على المحور المباشر .

يجب ان يلاحظ انه عند مناقشة الدائرة المكافئة الاعتيادية للحالات العابرة . والتي تم تتبعها لحد هذه المرحلة . وهناك تخيل لفولتية دافعة ثابتة متولدة داخل ملفات المنوب سوية مع مفاعلة تكون متغيرة في القيمة . الجزء X_L من X_s أو X_a هو فقط مفاعلـة حقيقية . بينما تمثل الاجزاء الباقية التغير الحاصل في محصلة القوة الدافعة المغناطيسية والقوة الدافعة الكهربائية المتولدة نتيجة لرد فعل الساكن . في الحقيقة فان تيار الدائرة القصيرة عند عامل قدرة واطيء جداً يقلل من القوة الدافعة الكهربائية المحتثة في الماكنة اكثر فأكثر كلما ازداد تأثير رد فعل المنتج .

اذا كان ج . م . ت القوة الدافعة الكهربائية في الطور وفي حالة الدائرة المفتوحة هو E_o وكانت قيمة مقاومة الساكن مهملة فعندئذ تكون قيمة ج . م . ت التيار في الحالة المستقرة هي $I = E_o/X_d$. بحيث يمكن ايجاد قيمة X_d من ذلك الجزء من الرسم الذبذبي الموضح في الشكل 7.9 الذي يصبح غلاف التيار عنده ثابتاً لايتغير . في الجزء الاول من هذا الرسم الذبذبي يمكن ايجاد قيمة ج . م . ت التيار المتناوب بقسمة قيمة الذروة – الى – الذروة للتيار على $2\sqrt{2}$. واذا ما رسم هذا التيار ناقصاً قيمة التيار المتناوب في الحالة المستقرة I بمقياس لوغارتمي كما مبين في الشكل 7.10 مع مقياس زمن خطي . يكون الرسم خطياً بغض النظر عن الدورات الاولى القليلة (حوالي خمس دورات) . و ميل هذا الجزء من المنحنى يعطي ثابت الزمن العابر T'_d . واذا سحب هذا الخط المستقيم الى الوراء ليقطع محور الصفر بالنسبة للزمن فسوف يعطي قيمة التيار العابر I'_d الذي يساوي E_o/X'_d . وعليه ستعرف X'_d بالمفاعلة العابرة للمحور المباشر . لمنوب توربيني ذي قطبين تقع X'_d بين 0·1 و 0·25 بنسبة الوحدة . ويكون المدى مشابهاً بالنسبة للمولدات ذات الطاقة المائية .

اذا رسمت قيمة ج . م . ت للتيار خلال الدورات الاولى . فوق القيم المرسومة على هيئة خط منقط كما مبين في الشكل 7.10 . بمقياس لورغارتمي مع مقياس زمن خطي . فسيؤدي الى خط مستقيم يعطي ميله ثابت الزمن دون العابر T''_d . وهذا المنحنى الجديد (أو ذاك في شكل 7.10) سيقطع محور الزمن الصفري بتيار $I''_d = E_o/X''_d$. حيث X''_d . المعرفة بهذه المعادلة . تسمى بالمفاعلة دون العابرة للمحور المباشر.



الشكل 7.10 . الرسم . للوغارتمي للمركبات العابرة ودون العابرة لتيار الدائرة القصيرة بمقياس زمن خطي

لمناقشة الاسباب المؤدية الى التغير في المفاعلة . يجب ان تؤخذ بنظر الاعتبار التغيرات الحادثة في الفيض المغناطيسي بسبب رد فعل المنتج . سيتم شرح هذا الموضوع هنا باختصار حيث ان هذه المسألة مطروقة بالتفصيل في معظم كتب المكائن المقررة للتدريس . ففي اللحظة التي تسبق وقوع قصر الدورة يكون هناك فيض قليل على المحور المباشر يشبك كلاً من الساكن والدوار . وهذا الفيض منشؤه الق . د . مغ في الدوار عندما تكون الماكنة في حالة الدائرة المفتوحة . اوبسبب محصلة الق . د . مغ للدوار والساكن عند مرور تيار ولو بسيط في الساكن . اذا تعرض تيار الساكن الى زيادة مفاجئة في حالة قصر الدائرة . فان الفيض الذي يشبك الساكن والدوار لايمكن ان تتغير قيمته لحظياً . وهذا سببه وجود التيارات الدوامة السارية في الدوائر المختلفة للدوار والتي تعارض هذا التغير . ولان الق . د . مغ للساكن تكون غير قادرة في البداية على انشاء اي رد فعل للمنتج . فان ذلك الجزء من المفاعلة التزامنية X_A المقابل لهذا الفعل لايكون موجوداً في البداية . ان المفاعلة الموجودة حقاً في بداية الامر وخلال اللحظات الاولى من حدوث قصر الدورة هي المفاعلة دون العابرة X_d'' . لهذا ستكون مشابهة في القيمة للمفاعلة التسربية X_L والتي تكون موجودة في حالة الاستقرار . وتتراوح قيم X_d'' بين 0·07 الى 0·18 بنسبة الوحدة لمنوب توربيني ذي قطبين بينما تتراوح قيمها لمنوب يشتغل بالطاقة المائية بين 0·1 و 0·3 بنسبة الوحدة وقد تتجاوز هذه القيم السالفة عند عدم وجود الملفات المخمدة .

ان التيارات الدوامة التي تسبب ثابت الزمن دون العابر الابتدائي T_d'' . تسري في حافة السن الفولاذي على كل من جانبي الفجوة الهوائية لمنوب ذي دوار اسطواني . في حالة المنوبات ذات السرع الواطئة المدورة بتوربينات مائية أو مكائن احتراق داخلي (ديزل) فان هذه التيارات الدوامة تسري في الملفات المخمدة المدفونة في اوجه الاقطاب . ولما كان ثابت الزمن لتضاؤل التيارات الدوامة في المسارات الفولاذية لسطوح الساكن والدوار او الملفات المخمدة T_d'' يتراوح بين دورة واحدة ودورتين بصورة عامة . فان قيمة المفاعلة التزامنية دون العابرة X_d'' هي التي تدخل في الحسابات اذا كان من الضروري معرفة تأثير التيار الابتدائي . ومثال على ذلك احتساب التيار المار في قاطع الدورة عندما يغلق في حالة قصر الدائرة .

اذا احتوت الماكنة على شرائح فولاذية بدون ملفات مخمدة فان المركبة دون العابرة لتيار قصر الدائرة تمحى فعلياً . وسيتضاءل التيار بصورة أسية بثابت الزمن T_d' . هذا

التضاؤل يحدث كلما تضاءلت التيارات الدوامة في ملف المجال . وسبب ذلك هو كون دائرة ملفات المجال المغلقة خلال مقاومة قليلة جداً ضمن دائرة المثير . تكون حلقة مغلقة لهذه التيارات . ولما كانت مركبة التيار المستمر في حالة قصر الدائرة في المجال تزداد الى قيمة تعادل X_d/X_d' مضروبة بقيمتها الاصلية . فان ثابت الزمن T_d' يكون بالتقريب مساوياً الى $(X_d'/X_d)T_{do}'$ اذا كان العطل على اطراف المولد مباشرة . حيث ان T_{do}' هو ثابت الزمن العابر للدائرة المفتوحة ويكون حاصل نسبة محاثة دائرة المجال الى المقاومة . وقد تكون X_d'/X_d حوالي $1/10$ او $1/5$. اما اذا كانت هناك ممانعة خارجية للدائرة $R_{ext}+j\,X_{ext}\,\Omega$ بين الماكنة ومكان العطل بحيث $R_{ext}\ll X_{ext}$ فان

$$T_d' \simeq \frac{X_d'+X_{ext}}{X_d+X_{ext}}T_{do}'.$$

وتكون قيمة ثابت الزمن العابر T_d' هذا في الاحوال الاعتيادية بحدود ثانية واحدة .

اما المفاعلة المستخدمة لايجاد ثابت الزمن T_a بالنسبة لمركبة التيار المستمر لتيار الساكن فتؤخذ بالتقريب مساوية الى مفاعلة التتابع السالب X_2 لطور الساكن (انظر الفقرة 7·6) . وهذا لأن اغلب التضاؤل الحادث لهذه المركبة يكون خلال الفترة دون العابرة كما تمت الاشارة اليه في الفقرة 7·6 . اما قيمة X_2 فتساوي بالتقريب الى معدل X_d'' و X_q'' حيث ان X_q'' هي المفاعلة دون العابرة للمحور العمودي .

اذا حدث عطل قصر دائرة ثلاثي الطور على أطراف منوب غير محمل له ج . م . ت فولتية طور يساوي الى $V_m/\sqrt{2}$. فعند اللحظة التي تكون فيها مركبة التيار المستمر في احد الأطوار باقصى قيمتها سيحمل ذلك الطور مركبة تيار مستمر كالاتي

$$I_{dc} = \frac{V_m}{X_d''}\,e^{-t/T_a} \qquad [7.1]$$

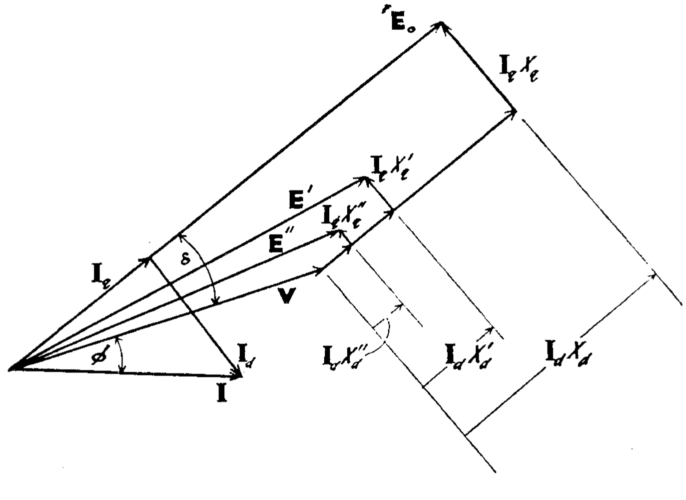
حيث ان T_a يساوي بالتقريب $X_2/2\pi fR$ ثانية و R هي مقاومة الساكن الطور

امـا المركبة المتناوبة للتيار في اي طور فتكون قيمتها مقدرة بـ ج . م . ت . كالاتي

$$I_{ac} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}\left[\left(\frac{1}{X''_d} - \frac{1}{X'_d}\right) e^{-t/T''_d} + \left(\frac{1}{X'_d} - \frac{1}{X_d}\right) e^{-t/T'_d} + \frac{1}{X_d}\right] \qquad [7.2]$$

ان لم يكن العطل على الاطراف مباشرة ففـي هذه الحالة يجب ادخال اي ممانعة للدائرة الخارجية . بضمنها ممانعة العطل نفسه . في المعادلتين [7.1] و[7.2] بذلك ستقل قيم مركبات التيار كافة وتتبدل ثوابت الزمن T_a و T'_d . لعطل حادث على بعد مسافة ما من نقطة التوليد قد تكون المقاومة كبيرة بدرجة تكفي لتقليل ثوابت الزمن T_a و T'_d الى قيم واطئة جداً . اضافة الى ذلك فان ممانعات الخطوط و المحولات الثابتة بين العطل والمولد قد تغطـي على التغير الحاصل في مفاعلة المنوب نفسه . لذلك تكون قيمة ج . م . ت للمركبة المتناوبة لتيار العطل ثابتة تقريباً .

من أكثر الحالات المعتادة وقوع عطل ماكنة عندما تكون مجهزة لتيار حمل **I** بعامل قدرة متأخر $\cos\phi$ قبل حدوث العطل وليس في حالة اللاحمل . الشكـل 7.11 يبين المخطط الطوري للحالة الشائعة هذه . وهو صورة معادة للشكل 7.8 باهمال مقاومة الساكن . عند الامعان في الشكل 7.11 يتبين انه قد اخذ بنظر الاعتبار تيار الحمل **I** قبل العطل وجعل مفاعلات الساكن على المحورين بحيث تأخذ القيم المناسبـة لها بالنسبة الى ظروف الحالات دون العابرة والعابرة والحالة المستقرة . وهذه تعطـي تعليلاً لاستخدام الفولتيات العاملة الخيالية **E″** . **E′** . **E**$_o$ والتي تعتبر مؤثرة خلال فترات مختلفة من الزمن بعد حصول العطل . وقد جرت العادة في الدراسات العديدة لمنظومة



الشكل 7.11 المخطط الطوري للمحورين يبين تيار قبل العطل والفولتيات خلف المفاعلات العابرة ودون العابرة

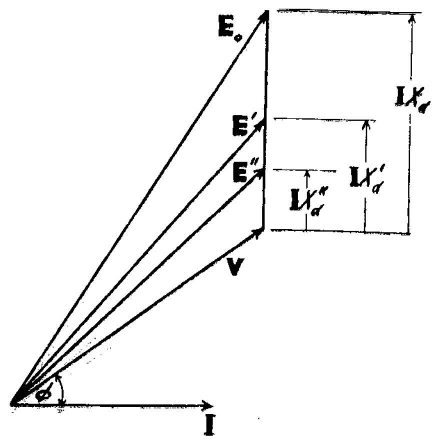
القدرة على فرض قيمة ثابتة ل ج . م . ت للتيار وبمستوى معين ومناسب لاي من الفترات الثلاث بعد العطل مباشرة وهي دون العابرة والعابرة وفترة الاستقرار .

عندما يتطلب تأمل التغير في التيار خلال اي فترة من هذه الفترات فانه من العموم والمفيد ابقاء المفاعلة ثابتة وتغيير الفولتية العاملة التي تكون خلفها بدلا من اعتبار المفاعلة نفسها تتغير . ان الفولتية E_o والتي تسمى بالفولتية خلف المفاعلة التزامنية ستكون مساوية لفولتية الطور الحقيقية في حالة الدائرة المفتوحة E_{oc} . اذا كانت كل الافتراضات للتحليلات البسيطة الواردة في الفقرة 7.2 في الواقع حقيقة . فمثلا اذا لم يكن هناك تشبع وكانت قيم التوافقيات جميعا صفرا .

عند هبوط تيار عطل في دائرة . لها نسبة مفاعلة محاثة الى مقاومة كبيرة . الى قيمة الحالة المستقرة وكان متأخرا عن الفولتيات بزاوية قدرها $\pi/2$ نصف قطرية فأنه من الكافي تمثيل الماكنة بمصدر لـ ق . د . ك E_o مع مفاعلة X_d عند تحليل منظومات القدرة بصورة عامة . بصورة مشابهة . اذا كانت الماكنة تحتوي على دوار مصمت أو ملفات مخمدة . وكانت الظروف في الدورة الأولى أو الثانية حرجة ففي هذه الحالة يمكن تمثيل الماكنة بقوة دافعة كهربائية ق . د . ك E'' (تعرف هذه احيانا بالفولتية خلف المفاعلة دون العابرة) ومفاعلة ثابتة مقدارها X''_d . لبعض الأغراض . وعلى سبيل المثال في دراسة استقرارية المنظومة . فأن الفترات الأولى هذه تكون أقل حرجا وعليه فمن الممكن استعمال تقريب أبسط متمثلا بـ ق . د . ك E' وهي الفولتية خلف المفاعلة العابرة . ومفاعلة ثابتة X'_d .

ان هذه الدائرة المكافئة البسيطة للماكنة تعطي بصورة عامة حسابات وافية ودقيقة لزاوية الماكنة عند التأرجح الأول . ولكن في بعض الدراسات الأستقرارية نحتاج الى تمثيل بتفاصيل أكبر . ومثال على ذلك عند حدوث انزلاق القطب (Day and Parton, 1965) . مما يجب ملاحظته هنا أنه في حالة استعمال أي فولتية من هاتين القيمتين E' أو E'' فانهما لايمكن اعتبارهما متقدمتين على فولتية الطرف V بزاوية الحمل δ . هذه التقريبات يمكن تبريرها أكثر اذا فرضنا اضافة الى الفرضيات السابقة . اهمال تأثير التشبع والتوافقيات . عدم وجود مقاومة للفات الساكن وعدم حدوث أي تغير في السرعة خلال العطل . وبذلك يمكن الفرض أن منافذة كل من المحور المباشر والمحور العمودي وكذلك المفاعلتان متساويتان . كما هي الحالة الحقيقية لمنوب توربيني ذي دوار اسطواني . ان نهايات المطاورات V و E'' و E' وكذلك E_o في الشكل 7.11

تكون في هذه الحالة على الخط نفسه وبذلك يمكن تقليص الشكل 7.11 الى الشكل 7.12 . المبين في أدناه .



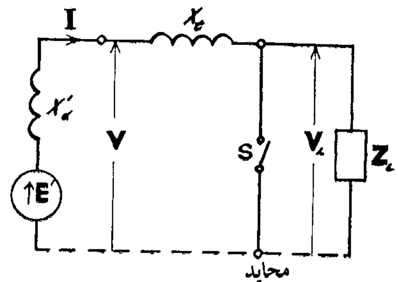
الشكل 7.12 المخطط الطوري التقريبي لمنوب ذي دوار اسطواني لتيار قبل العطل وفولتيات خلف المفاعلات دون العابرة والعابرة .

يتضح مما سبق أنه من الممكن تمثيل مولد محمل معرض بصورة مفاجئة الى زيادة في التيار بسبب عطل ما . بقوة دافعة كهربائية E'' على التوالي مع مفاعلة X''_d أو ق . د . ك E' مع مفاعلة X'_d حيث ان

$$\left.\begin{aligned} E'' &= V + j\,IX''_d \\ E' &= V + j\,IX'_d \end{aligned}\right\} \qquad [7.3]$$

وهذه القوى الدافعة الكهربائية تسمى أيضاً بالفولتيات خلف المفاعلة دون العابرة والعابرة على التوالي . من المعتاد الفرض ان كلاً من الـ ق.د.ك والمفاعلة تبقى ثابتة خلال أي من الفترتين في الحالة اللامستقرة التي تتم خلالهما الدراسة اذا لم يكن العطل بجوار الماكنة مباشرة .

يبين الشكل 7.13 طوراً واحداً من منوب له تيار حمل قبل العطل I والذي جهز الى حمل متوازن ذي ممانعة طور مقدارها Z_L . خلال منظومة تحتوي على ممانعة كليـة مكافئة للمحولات والخطوط مقدارها X_t .



الشكل 7.13 الدائرة المكافئة لعطل على منوب محمل خلال الفترة العابرة .

ان الفولتية خلف المفاعلة العابرة في الدائرة المكافئة للمولد والتي تعد المسؤولة عن سريان التيار خلال الفترة العابرة بعد حصول عطل ثلاثي الطور في الحمل هي $\mathbf{E}'$. وهذه تنسب الى فولتية الاطراف الفعلية قبل حصول العطل عند المولد وطرف الحمل $\mathbf{V}$ و $\mathbf{V}_L$ على التوالي بالمعادلة التالية

$$\mathbf{E}' = \mathbf{V}_L + \mathrm{j}\,\mathbf{I}(X_d' + X_t) = \mathbf{V} + \mathrm{j}\,\mathbf{I}X_d'.$$

اذا حدث عطل ثلاثي الطور بممانعة صفر عند الحمل . وهذا مكافيء لغلق الاقليب S (switch-) في الشكل 7.13 . فباستخدام نظرية ثفنن (يمكن استخدامها في هذه الحالة حيث ان المفاعلات اعتبرت ثابتة خلال الفترة تحت الدراسة) . وعليه فان التيار الذي يمر عبر الدائرة القصيرة خلال الفترة العابرة هو

$$\mathbf{I}' = \frac{\mathbf{V}_L(\mathbf{Z}_L + X_t + X_d')}{\mathbf{Z}_L(X_t + X_d')}, \qquad [7.4]$$

والتيار الذي يمر في المولد خلال الفترة العابرة هو $\mathbf{I}' + \mathbf{I}$
في حالة المحرك التزامني الذي يستلم القدرة من مصدر ثلاثي الطور . فان العطل الذي يجعل فولتية المصدر تهبط قد يجعل الماكنة تجهز قدرة من طاقتها المخزونة الى المنظومة والعطل كليهما . الى ان يتم فصل العطل أو ان هبوط السرعة للماكنة يؤدي الى نقصان في الـ ق . د . ك الداخلية بمقدار كاف نسبة الى الفولتية المجهزة . ان التغيرات الحادثة في قيمة مفاعلة المحرك التزامني تشبه تماماً تلك التي تحدث للمولد التزامني (المنوب) ، . لذلك فانه من الممكن ايجاد فولتيات الماكنة المؤثرة خلف المفاعلة دون العابرة والمفاعلة العابرة باستخدام المعادلة [7.3] بعكس اشارة هبوط الفولتية للمفاعلة فيها .

مثال محلول 7.2

منوب قدرة 100-MVA بفولتية 22 ك . ف . مفاعلته العابرة 0·25 بنسبة الوحدة . يجهز حملا عبر خط نقل مفاعلته 0·05 بنسبة الوحدة عند 100 MVA . خلال فترة خاصة كان الحمل مكافئا لمحرك تزامني قدرة 50-MVA مع مفاعلة عابرة قدرها 0·20 بنسبة الوحدة . باخذ قدرة 40 MW بعامل قدرة متقدم 0·8 وفولتية طرف 21·9 ك . ف .

احسب التيارات المارة في كل من هاتين الماكنتين في حالة حدوث عطل ثلاثي الطور على اطراف المنوب وكذلك التيار في العطل خلال الفترة العابرة .

الحـل :

التيار الاساس لقدرة 100 MVA وفولتية 22 ك . ف يكون

$100 \times 10^6/(\sqrt{3} \times 22 \times 10^3) = 2625\ A$ أمبير

ويكون مقدار تيار الحمل

$40 \times 10^6/(\sqrt{3} \times 21{\cdot}9 \times 10^3 \times 0{\cdot}8) = 1320$ أمبير

$= 1320/2625 = 0{\cdot}503$ بنسبة الوحدة

اذا كانت فولتية طرف المحرك هي المطاور المرجع . فعند ذلك يكون تيار الحمل

$0{\cdot}503\ (0{\cdot}8 + j\,0{\cdot}6) = 0{\cdot}402 + j\,0{\cdot}302$ بنسبة الوحدة

لذلك تكون فولتيات الطرف للمولد والمحرك قبل حدوث العطل هي

$$\mathbf{V}_G = (21{\cdot}9/22{\cdot}0 + j\,0) + j\,0{\cdot}05(0{\cdot}402 + j\,0{\cdot}302) = 0{\cdot}9799 + j\,0{\cdot}0201$$

بنسبة الوحدة

وكذلك

$\mathbf{V}_M = 21{\cdot}9/22{\cdot}0 + j\,0 = 0{\cdot}995 + j\,0$ بنسبة الوحدة

اما فولتية المولد خلف المفاعلة العابرة فتكون

$$\mathbf{E}'_G = 0{\cdot}9799 + j\,0{\cdot}0201 + j\,0{\cdot}25(0{\cdot}402 + j\,0{\cdot}302)$$

$= 0.9044 + j\,0.1206$ بنسبة الوحدة

وفولتية المحرك خلف المفاعلة العابرة تكون

$$E'_M = 0.995 + j\,0 - j\,0.40(0.402 + j\,0.302)$$

$= 1.1158 - j\,0.1608$ بنسبة الوحدة

اما التيارالكلي للعطل خلال الفترة العابرة فيمكن الان ايجاده بطريقة التراكب بايجاد المركبتين I'_G و I'_M اللتين تمران خلال الأقليد S (الشكل 7.14) عندما يغلق ليمثل العطل .

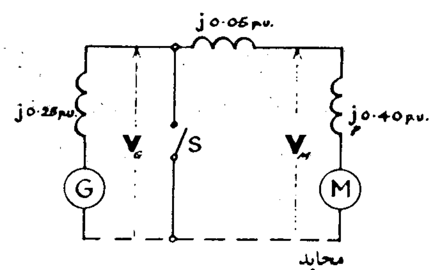
ولأن العطل عد كأنه دائرة قصيرة لها ممانعة صفر . ففي هذه الحالة سوف لاتغذي الماكنة G الماكنة M أي تيار . عليه

$I'_G = E'_G/j\,0.25$

$I'_G = (0.9044 + j\,0.1206)/j\,0.25$

$= 0.4824 - j\,3.6176$ بنسبة الوحدة

أو $I'_G = 1265 - j\,9490$ أمبير



الشكل 7.14 .

وبالاسلوب نفسه

$$I'_M = E'_M/j\,0.45 = (1.1158 - j\,0.1608)/j\,0.45$$

$I'_M = -0.3573 - j\,2.4795$ بنسبة الوحدة

$I'_M = -938 - j\,6500$ أمبير

ويكون التيار الكلي لكل طور في حالة قصر الدائرة

$$= I'_M + I'_G = 327 - j\,15\,990 \quad \text{أمبير}$$

مثال محلول 7.3

مولدان ثلاثيا الطور فولتيتاهما 22 كيلوفولت وترددهما 50 هزتز . احدهما بقدرة 60 MVA ومفاعلة عابرة 0·18 بنسبة الوحدة والاخر بقدرة 100 MVA ومفاعلته العابرة 0·2 بنسبة الوحدة مربوطان الى قضيب توزيع مربوط به محول قدرة 150-MVA وفولتيته 22/132 ك . ف . مفاعلته التسربية 0·12 بنسبة الوحدة . يغذي هذا المحول خط نقل محاثته 27·8 ملي هنري . عند الطرف الاخر من الخط يوجد محول ثان بقدرة 150-MVA وفولتية 132/11 ك . ف مفاعلته التسربية 0·09 بنسبة الوحدة . يجهز قضيب توزيع مقدار الفولتية عنده 10·55 ك . ف عند ايصال الاحمال التالية اليــه

(أ) حمل ثلاثي الطور متوازن بقدرة 40 MW وبعامل قدرة متأخر 0·8 .
(ب) محرك تزامني قدرة 20 ميكا فولت امبير مفاعلته العابرة 0·16 بنسبة الوحدة يستهلك 20-MVA بعامل قدرة متقدم 0·9 . ان المولدين يقتسمان القدرة المتفاعلة (الفولت – امبير) للمنظومة بالتساوي فيما بينهما ولكنهما يقتسمان القدرة الفعالة بنسبة قدرتيهما المقننتين .

اذا حدث عطل ثلاثي الطور وحدثت شرارة لها مقاومة مؤثرة 0·0484 أوم بين كل خط والارض على اطراف المحرك . عندما تكون الاحمال اعلاه مجهزة بالقدرة . فاحسب التيار في كل من المولدين والماكنة التي كانت تعمل محركاً قبل ذلك خلال الفترة العابرة بعد حدوث العطل .

الحـــل :

اذا اخذت القدرة 100 MVA أساساً . فعند الفولتية 132 ك . ف يساوي التيار الاساس

$$10^8/(\sqrt{3} \times 132\,000) = 437{\cdot}37 \quad \text{أمبير}$$

مفاعلة الخط بنسبة الوحدة عند 100 MVA وفولتية 132 ك . ف

$$= j\,\frac{27{\cdot}8 \times 2\pi \times 50}{1000} \times \frac{437 \times \sqrt{3}}{132\,000} = j\,0{\cdot}05 \quad \text{بنسبة الوحدة}$$

المولد A قدرته المقننة 60 MVA وله $j X'_d = j\,0{\cdot}18 \times 100/60$

بنسبة الوحدة (عند 100 MVA) $= j\,0{\cdot}3$

المحرك التزامني M له

بنسبة الوحدة $j X'_d = j\,0{\cdot}16 \times 100/20 = j\,0{\cdot}8$

المحول 22/132 ك . ف له مفاعلة تسربية $j\,0{\cdot}12 \times 100/150 = j\,0{\cdot}08$
مقدرة بنسبة الوحدة والمحول 132/11 ك . ف له مفاعلة مقدارها $j\,0{\cdot}06$ بنسبة الوحدة
مقاومة العطل بين كل خط والارضي تكون

بنسبة الوحدة $437 \times 12 \times 0{\cdot}0484 \times \sqrt{3}/11\,000 = 0{\cdot}04$

وذلك لان التيار المنسوب الى جهة الـ 11 ك . ف يكون أثني عشرة مرة مضروباً في التيار الاساس على جهة الـ 132 ك . ف وهذا يعني 5248 أمبير .
الحمل ذو 40-MW يحمل تياراً قبل العطل مقداره

$$\frac{40 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 10\,550 \times 0{\cdot}8}(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6)\text{ A} = 2736(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6)\text{ A}$$

وذلك باخذ فولتية قضيب التوزيع للمحرك قبل العطل بوضعها مطاووراً مرجعاً في عموم الحسابات .
تكون ممانعة هذا الحمل هي

$$10\,550/[\sqrt{3} \times 2736(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6)] = 2{\cdot}23(0{\cdot}8 + j\,0{\cdot}6)\,\Omega$$

وهذه تكون

بنسبة الوحدة $\dfrac{5248 \times 2{\cdot}23 \times \sqrt{3}}{11\,000}(0{\cdot}8 + j\,0{\cdot}6) = 1{\cdot}4716 + j\,1{\cdot}1037$

اما تيار حمل الـ 40-MW فيكون

$$2736(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6) = 2736(0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6)/\ 5248$$

بنسبة الوحدة $= 0{\cdot}41707 - j\,0{\cdot}3128$

قبل حصول العطل ، تيار المحرك هو

$$20 \times 10^6(0 \cdot 9 + j\,0 \cdot 436)/\ (\sqrt{3} \times 10\ 550)\ =\ 985 + j\ 477\ A$$

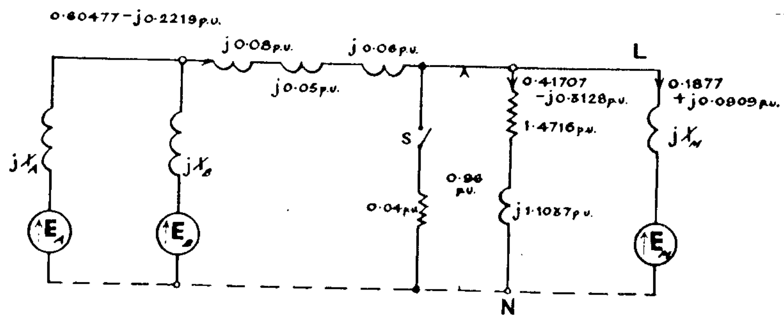
$$= (985 + j\ 477)/5248$$

$= 0 \cdot 1877 + j\,0 \cdot 0909$ بنسبة الوحدة

التيار الكلي المجهز من قبل المولدين عبر المحولين والخط قبل العطل يكون

$0 \cdot 41707 - j\,0 \cdot 3128 + 0 \cdot 1877 + j\,0 \cdot 0909 = 0 \cdot 60477 - j\,0 \cdot 2219$ بنسبة الوحدة

ان تيارات ماقبل العطل هذه والفولتية التي تساوي $10\ 550/\ 11000 \doteq 0 \cdot 96$ بنسبة الوحدة مبينة مع ممانعات المنظومة في الشكل 7.15 اما المفاعلات التزامنية للمكائن X_A و X_B وكذلك X_M والقوى الدافعة الكهربائية الداخلية $\mathbf{E}_A$ و $\mathbf{E}_B$ و $\mathbf{E}_M$ فهي غير معلومة ولانحتاجها في الحسابات في الوقت الحاضر .



الشكل 7.15 . الظروف قبل حدوث العطل

عندما يحدث العطل على المنظومة . اي عندما يغلق الأقليد S فمن المفروض أن X_A و X_B وكذلك X_M تأخذ حالا القيم $j\,0 \cdot 3$ و $j\,0 \cdot 2$ و $j\,0 \cdot 8$ بنسبة الوحدة وتبقى هذه المفاعلات ثابتة عند هذه القيم خلال الفترة المحددة تحت الدراسة . وكذلك تأخذ الـ ق . د . ك جميعها الفولتيات خلف المفاعلة العابرة وتبقى ثابتة عند ج . م . ت هذه القيم .

يمكن ايجاد تيار العطل حالا وبطريقة تفنن . حيث ان الممانعة عند الطرف LN من ذلك الجزء من خط النقل وعندما لاتولد الماكنتان A و B أي قوة دافعة كهربائية تساوي

بنسبة الوحدة $= j\,0{\cdot}19 + j(0{\cdot}3 \times 0{\cdot}2/0{\cdot}5) = j\,0{\cdot}31$

من اللحظة التي يحصل عندها العطل

أما في الطرف LN على جانب الحمل من لحظة بدء العطل. فتكون هناك ممانعة مقدارها بنسبة الوحدة

$$j\,0{\cdot}8(1{\cdot}4716 + j\,1{\cdot}1037)/(1{\cdot}4716 + j\,1{\cdot}9037) = 0{\cdot}1632 + j\,0{\cdot}5894$$

وعليه تكون ممانعة الدائرة بأكملها عند الطرف LN

$$j\,0{\cdot}31(0{\cdot}1632 + j\,0{\cdot}5894)/(0{\cdot}1632 + j\,0{\cdot}8994) = 0{\cdot}01877 + j\,0{\cdot}20656$$

بنسبة الوحدة

أما التيار الذي يسري خلال الشرارة الكهربائية الحادثة فهو

بنسبة الوحدة $0{\cdot}96 + j\,0/(0{\cdot}04 + 0{\cdot}01877 + j\,0{\cdot}20656) = 1{\cdot}2233 - j\,4{\cdot}2995$

وفولتية الطور (من الخط الى المحايد) عند نقطة العطل V_{LN} تساوي

بنسبة الوحدة $0{\cdot}04(1{\cdot}2233 - j\,4{\cdot}2995) = 0{\cdot}048932 - j\,0{\cdot}17198$

التيار الذي يمر في الحمل والذي أخذ 40 MW سابقاً يكون

بنسبة الوحدة $0{\cdot}048932 - j\,0{\cdot}17198/(1{\cdot}4716 + j\,1{\cdot}1037) = -0{\cdot}034815 - j\,0{\cdot}090754$

عليه تجهز المكائن الثلاث سوية تياراً مقداره

$$1{\cdot}2233 - j\,4{\cdot}2995 - 0{\cdot}03482 - j\,0{\cdot}09075 = 1{\cdot}18848 - j\,4{\cdot}3903$$

بنسبة الوحدة

أما أقتسام هذا التيار بين هذه المكائن الثلاث فيمكن ايجاده باستخراج الفولتيات خلف المفاعلة العابرة لهذه المكائن باستخدام المعادلة [7.3]

قبل حدوث العطل. جهزت الماكنتان A و B سوية تياراً مقداره $0{\cdot}60477 - j\,0{\cdot}2219$ بنسبة الوحدة. وتياريهما كل على انفراد I_A و I_B يجب ان يستخرجا الآن.

ان الفولتية عند طرف المولدات قبل العطل يمكن ايجادها من النظر الى الشكل 7.15 وهي

$$0{\cdot}96+j\,0+j\,0{\cdot}19(0{\cdot}60477-j\,0{\cdot}2219) = 1{\cdot}00216+j\,0{\cdot}11491$$

بنسبة الوحدة

وعليه تكون القدرة المركبة الخارجة لكل طور من المولدات الى المنظومة

$$\mathbf{VI}^* = (1{\cdot}00216+j\,0{\cdot}11491)(0{\cdot}60477+j\,0{\cdot}22188)$$

$$P+j\,Q = 0{\cdot}58058+j\,0{\cdot}29184$$ بنسبة الوحدة

ولما كانت المكائن تقتسم القدرة بالتناسب مع قدراتها المقننة فعليه

تجهز الماكنة A قدرة بنسبة الوحدة = $3/8\times 0{\cdot}58058 = 0{\cdot}21772$

تجهز الماكنة B قدرة بنسبة الوحدة = $5/8\times 0{\cdot}58058 = 0{\cdot}36286$

وتجهز كلتا الماكنتين أعلاه قدرة متفاعلة (فولت أمبير) مقدار $+j\,0{\cdot}14592$ بنسبة الوحدة

واذا كان التيار $\mathbf{I}_A = a-j\,b$ بنسبة الوحدة فتكون $0{\cdot}21772$ هي الجزء الحقيقي من ($a+j\,b$) ($1{\cdot}00216+j\,0{\cdot}11491$) وتساوي في هذه الحالة $1{\cdot}00216a-0{\cdot}11491b$ (المعادلة أ)

وكذلك فان $0{\cdot}14592$ هي الجزء الخيالي من ($a+j\,b$) ($1{\cdot}00216+j\,0{\cdot}11491$)

وتساوي $0{\cdot}11491a+1{\cdot}00216b$ (المعادلة ب)

وبحل المعادلتين أ و ب أعلاه نجد ان

$$a = 0{\cdot}23091 \text{ and } b = 0{\cdot}11913$$

$$a+c = 0{\cdot}60477$$
$$c = 0{\cdot}37386$$

وكذلك

$$b+d = 0{\cdot}22188$$
$$d = 0{\cdot}10275.$$

والتيارات في المولدين قبل العطل يكونات في هذه الحالة :

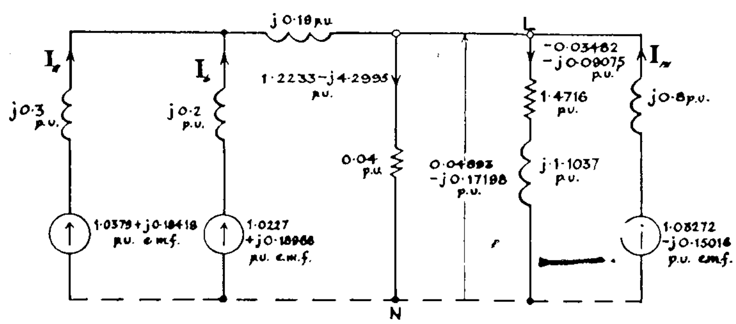
$$\mathbf{I}_A = 0{\cdot}23091 - j\,0{\cdot}11913$$
$$\mathbf{I}_B = 0{\cdot}37386 - j\,0{\cdot}10275.$$

من المعادلة [7.3] تكون الفولتيات خلف المفاعلة العابرة كالآتي وعلى التوالي :

$$\mathbf{E}'_A = 1{\cdot}00216 + j\,0{\cdot}11491 + j\,0{\cdot}3(0{\cdot}23091 - j\,0{\cdot}11913)$$
$$\mathbf{E}'_B = 1{\cdot}00216 + j\,0{\cdot}11491 + j\,0{\cdot}2(0{\cdot}37386 - j\,0{\cdot}10275)$$
$$\mathbf{E}'_A = 1{\cdot}03790 + j\,0{\cdot}18418$$
$$\mathbf{E}'_B = 1{\cdot}02271 + j\,0{\cdot}18968.$$

أما الفولتية $\mathbf{E}'_M$ خلف المفاعلة العابرة في الماكنة التي كانت سابقاً تعمل محركاً فتكون

$$\mathbf{E}'_M = 0{\cdot}96 + j\,0 - j\,0{\cdot}8(0{\cdot}1877 + j\,0{\cdot}0909)$$
$$= 1{\cdot}03272 - j\,0{\cdot}15016$$



الشكل 7.16 خلال الفترة العابرة للعطل

(القيم جميعا مقدرة بنسبة الوحدة)

الشكل 7.16 يبين القوى الدافعة الكهربائية الثلاث وفولتية الطرف مقدرين بنسبة الوحدة عند مكان العطل . وكذلك يبين الممانعات لكل فرع والتيارات في الفروع الواصلة بين خطين ومحايد مقدرة بنسبة الوحدة أيضا . أما التيارات I_a و I_b وكذلك I_m التي تسري خلال المكائن الثلاث فيمكن الآن ايجادها من الطرف الأيمن للشبيكة نجد أن

$$0{\cdot}048932 - j\,0{\cdot}17198 = 1{\cdot}03272 - j\,0{\cdot}15016 - j\,0{\cdot}8\,\mathbf{I}_m$$

عليه يكون $\mathbf{I}_m = 0{\cdot}027275 - j\,1{\cdot}2297$ بنسبة الوحدة . ولما كان التيار الأساس في منظومة 11 ك . ف هو 5248 أمبير . فالماكنة التي كانت سابقاً تعمل محركاً . تغذي تياراً مقداره $143 - j\,6453$ أمبير الى المنظومة خلال الفترة العابرة .

ان التيار الكلي الذي تجهزه الماكنتان A و B هو

$$1{\cdot}2233 - j\;4{\cdot}2995 - 0{\cdot}034815 - j\;0{\cdot}090754 - 0{\cdot}027275 + j\;1{\cdot}2297$$
$$= 1{\cdot}1612 - j\,3{\cdot}1606.$$

أما فولتية الطرف لهاتين الماكنتين فهي

$$= 0{\cdot}04893 - j\,0{\cdot}17198 + j\,0{\cdot}19(1{\cdot}1612 - j\,3{\cdot}1606)$$

$$= 0{\cdot}64944 + j\,0{\cdot}04865$$ بنسبة الوحدة

وللماكنة A :

$$1{\cdot}0379 + j\,0{\cdot}18418 - j\,0{\cdot}3\,\mathbf{I}_a = 0{\cdot}64944 + j\,0{\cdot}04865$$

لذلك يكون بنسبة الوحدة $\mathbf{I}_a = 0{\cdot}4518 - j\,1{\cdot}295$

ان التيار الأساس عند 22 ك . ف هو 2624 أمبير . وعليه

$\mathbf{I}_a = 1186 - j\,3398$ أمبير

وللماكنة B :

$$1{\cdot}02271 + j\,0{\cdot}18968 - j\,0{\cdot}2\,\mathbf{I}_b = 0{\cdot}64944 + j\,0{\cdot}04865$$

لذلك

$\mathbf{I}_b = 0{\cdot}7052 - j\,1{\cdot}8663$ بنسبة الوحدة

وتحقيقا لما ورد

$\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b = 1{\cdot}1570 - j\,3{\cdot}1613$ بنسبة الوحدة

ان الخطأ في هذا المجموع مقارنة بالقيمة المعطاة أعلاه هو أقل من 0·4 % في المركبة المنطبقة الطور و 0·02 % في المركبة العمودية . وهذا يوضح بأن الحل الذي تم

الحصول عليه هنا بوساطة الجداول اللوغارتمية أو بوساطة ماكنة الحساب اليدوية والتي تعطي نتائج لعدة ارقام بعد الفارزة يمكن ان تترك أخطاء ملحوظة والتي تتعاظم بعمليات الطرح الحسابية لكميات لها حجوم متشابهة. لقد وضح المثال المحلول السالف أيضاً العمليات الحسابية الطويلة المتعبة التي أجريت حتى لو كانت منظومة القدرة المعنية بسيطة جداً. وتظهر أعباء هذه الحسابات بصورة واضحة في المنظومة الحقيقية الحاوية على عدد كبير من المكائن والمحولات وخطوط النقل... الخ. بحيث تستغرق حساباتها وقتاً طويلا باستخدام الطريقة اليدوية. لقد تم التغلب على هاتين المعضلتين باستخدام الحاسب الالكتروني. ويحتوي الجزء الثاني من هذا الكتاب على مادة ضخمة تخص كتابة المعادلات الخاصة في تحليل منظومة القدرة بصيغة بحيث تلائم معاملتها بوساطة الحاسب الألكتروني.

7.6 التحميل أو الاعطال غير المتوازنة : مفاعلات التتابع

Unbalanced Loading or Faults: Sequence Reactances

في هذه الفقرة سوف يعطى اهتمام قليل للحالات غير المتوازنة. ولكن عند التعامل مع الاعطال غير المتوازنة (أنظر الفصل الثامن). ستضمن الموضوع الأخذ بنظر الاعتبار ممانعات التتابع السالب والتتابع الصفري للمكائن التزامنية. والسبب في ذلك هو اختلاف هذه الممانعات عن ممانعة التتابع الموجب للأسباب المشار اليها هنا. (من المقترح ان يراجع الجزء الخاص بالمركبات المتماثلة في الفصل الثامن قبل قراءة هذه الفقرة).

ان موجة الـ ق. د. مغ التي يسببها تيار التتابع الموجب في ملفات الساكن تدور تزامنيا مع الدوار والـ ق. د. مغ التي فيه (وهذا يعني أنهما في السرعة نفسها وفي الأتجاه نفسه لموجة الـ ق. د. مغ التي يولدها التيار المستمر في ملفات الدوار نفسها).

اما القوة الدافعة المغناطيسية التي ينشئها تيار التتابع السالب للساكن تتحرك بسرعة تعادل ضعف السرعة التزامنية بالنسبة للدوار وذلك لانها تدور عكس اتجاه دوران الدوار وبسرعته التزامنية نفسها. لذلك فهي تتحرك بصورة متناوبة مارة بالمحور المباشر والمحور التعامدي. ولأنها تنشيء تأثيرا متغيرا لرد فعل المنتج. تكون مفاعلة التتابع السالب X_2 مفاعلة دون عابرة وتؤخذ معدلا لقيم مفاعلات التتابع الموجب دون العابرة على المحورين المباشر والتعامدي. ولهذا السبب تكون ($X_2 \simeq \frac{1}{2}(X_d'' + X_q'')$). ليس من الضروري عادة تمييز اي تغيير زمني في متجه X_2 (او X_0) خلال الظروف العابرة. وذلك

لانه لايوجد رد فعل للمنتج طبيعي وثابت يمكن ان يؤثر. وتتراوح قيم X_2 بصورة عامة لمنوب توربيني ثنائي القطب بين 0·07 و 0·2 بنسبة الوحدة. للمكائن ذات الأقطاب البارزة الحاوية على ملفات مخمدة تتراوح X_2 عموما بين 0·1 و 0·3 بنسبة الوحدة. وقد تزيد على هذه القيم ان لم تكن الماكنة حاوية على ملفات مخمدة. مما تجدر الاشارة اليه انه سوف تكون هناك مقاومة للتتابع السالب تأخذ حساباً للقدرة الضائعة في الملفات المخمدة لاقطاب الدوار بسبب التيار المحتث فيها. حيث يكون تردد هذا التيار ضعف تردد المصدر. ان فترة وكمية العطل أو التحميل غير المتوازن يجب ان تحدد بالمرحلات ذات التتابع السالب. حتى لاتسبب هذه المفاقيد زيادة في حرارة أوجه الاقطاب أو قضبان الملفات المخمدة.

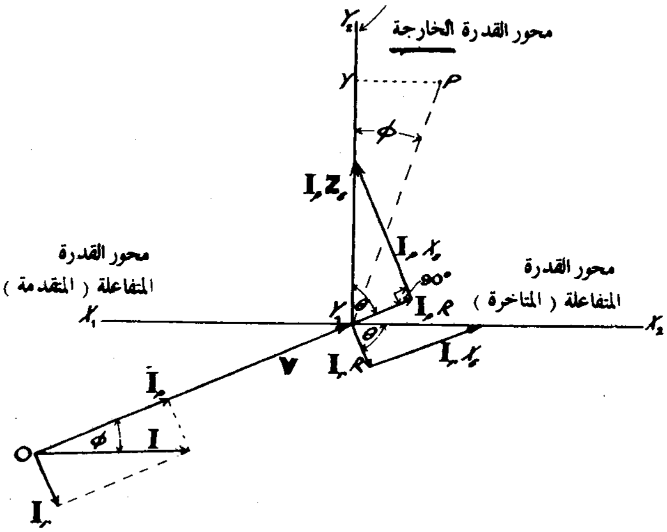
ان تيارات التتابع الصفري في ملفات الساكن لاتسبب اي مجال مغناطيسي دوار. وذلك يعود الى ان كل ال ق. د. مغ في الاطوار الثلاثة تكون بالطور الزمني نفسه. واذا. أنتج كل ملف طور ق. د. مغ جيبية في الفراغ. فعند غياب الدوار. سوف يكون الفيض عند نقطة ما على محور الساكن بسبب تيار التتابع الصفري صفراً. عند اية لحظة. اذا اخذ بنظر الاعتبار الفيض في الفجوة الهوائية أوالفيض المتسرب حول الاخاديد او توصيلات النهايات فسوف لاتكون هناك نقطة في هذه المناطق متساوية المسافة من جميع ملفات الاطوار الثلاثة للساكن. اضافة الى ذلك. فان ال ق. د. مغ المتولدة عن ملف طور تبتعد عن كونها موجة جيبية. ويعتمد مقدار هذا الابتعاد على الترتيب الفراغي للملفات نفسها. عليه فان قيمة مفاعلة التتابع الصفري الحقيقية ستعتمد على التوتير (chording) وعامل العرض للملفات الساكن في كل طور. لهذا فستكون قيمتها متغيرة بصورة محسوسة اعتمادا على تفاصيل الملف ذاته. ولكن لمنوب توربيني ذي قطبين قد تقع قيم هذه المفاعلة بين 0·02 و 0·15 بنسبة الوحدة. وللمولدات الكهرومائية تقع بين 0·04 و 0·2 بنسبة الوحدة.

7.7 اشتغال المكائن التزامنية المربوطة الى قضبان توزيع لانهائية.

Operation of Synchronous Machines Connected to Infinite Busbars

يقصد بقضبان التوزيع اللانهائية. تلك القضبان المربوطة ضمن شبكة منظومة كبيرة تشتغل تحت ظروف متوازنة ومستقرة. بحيث انه اذا ربط منوب اسطواني الدوار يمتاز بكون مفاعلتيه X_d و X_q متساويتان تقريبا. فأن هذه القضبان (لاتتأثر ظاهريا بأي شكل

من الاشكال عند التغير الحاصل في جهاز الاثارة او التحميل لهذا المولد. وعليه يقال عن هذه الماكنة بأنها مربوطة الى قضبان توزيع لانهائية.

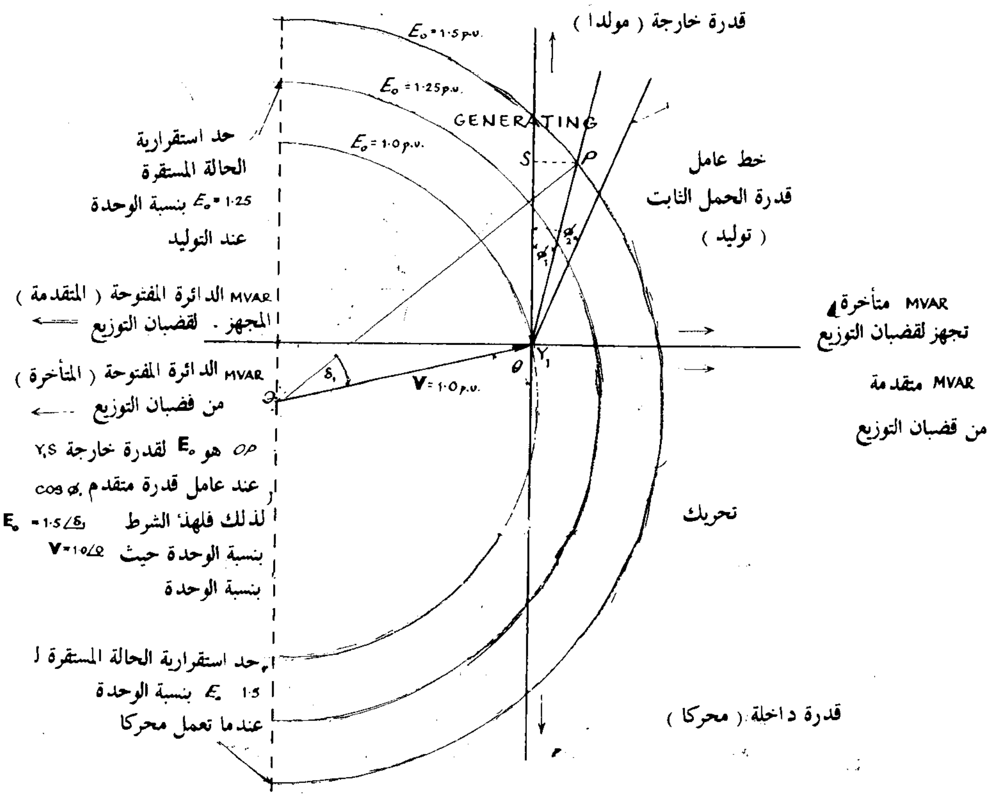


الشكل 7.17 . المخطط الطوري لمولد اسطواني الدوار يشتغل بظروف مستقرة ومربوط الى قضبان توزيع لانهائية

انفولتيةالطرف V في الشكل 7.4 ستكون ثابتة على هذا الاساس. ولـكن التغير في القدرة الداخلة للمدور الابتدائي قد يؤدي الى تغير في مركبة التيار المنطبقة الطور I_p . والتغير في الاثارة يمكن ان يغيرّ الق. د. ك E_o و E وكذلك المركبة التعامدية أو المتفاعلة للتيار I_r . اذا تغير I_p . وهذا يعني تغير في القدرة الخارجة. مع كون I_r صفـــراً سيؤدي الى تحرك الق. د. ك E_o (ق. د. ك خلف المفاعلة التزامنية) على طول مســار يتمثل بخط يصنع زاوية مقدارها $\theta = \tan^{-1} X_s/R$ مع مطاور فولتية الطرف V . لذلك يجب تأشير المقياس بالقدرة الخارجة على محور القدرة $Y_1 Y_2$ كما موضح في الشكل 7.17 (انظر الفقرة 1.2.2). وبالاسلوب نفسه يجب تأشير المقياس بالفولت – امبير المتفاعل او MVAr . على طول المحور $X_1 X_2$ الذي يكون على زاوية قائمة مع $Y_1 Y_2$ والذي يعتبر مسار E_o اذا كان I_p يساوي صفرا و I_r متغيرا.

اذا أخذت فولتية الطرف للطور V بوصفها مطاورا مرجعا واذا كان تيار الطور هـو $I = I_p - j I_r = I/-\phi$. فالقوة الدافعة الـكهربائية المتولدة خلف الممانعة التزامنية

يمكن ايجادها بتوصيل نقطة O الى نقطة P على خط يخرج من Y_1 ويصنع زاويــة ϕ مع محور القدرة . ومع الجزء المحصور مع ذلك المحور Y_1Y . المسافة Y_1Y عـلى مقياس القدرة تمثل كمية القدرة الخارجة $3VI_p$.



الشكل 7.18 ماكنة ذات دوار اسطواني تشتغل في حالة استقرار على قضبان توزيع لانهائية

لذلك يكون مقياس واحد اما بالفولتية او بالـ MVA كيفياً . وبتثبيت مقياس واحـــد فقط يتحدد في ضوءه المقياس الاخر .

ان الشكل 7.17 يمكن تحويله من مخطط فولتية الى مخطط MVA وذلـك بضرب كل مطاور بـ $3V/Z_s$. وهذا ماهو معمول به حقيقة فـي الشكـل 7.21 .

ان لـكل دائرة لقيم E_o المعطاة والموضحة في الشكل 7.18 توجد قيمة مناظرة وثابتة للتيار I_f . واذا لم يكن هناك تشبع فسوف تتناسب E_o مع I_f تناسبا طرديــاً .

وعليه يمكن في هذه الحالة تأشير E_o التي تساوي 1·0 بنسبة الوحدة بالتيار I_f الذي يساوي 1·0 بنسبة الوحدة ولقيمة $E_o = 0{\cdot}75$ بنسبة الوحدة يكون $I_f = 0{\cdot}75$ بنسبة الوحدة . الخ . على المنحنى . ان المنحنيات التي تمثل تياراً لمجال ثابت يمكن ان تؤخذ بشكل دوائر تقريبا . ويكون مركزها في نقطة O أما انصاف اقطارها فيمكن ايجادها من المنحى الذي يمثل الدائرة المفتوحة للماكنة . ولما كانت $X_s \gg R$. بهذه الحالة $\theta \rightarrow \pi/2$ بالدرجات نصف القطرية والنقطة O في الشكل 7.18 يمكن اخذها بحيث تقع على محور الـ MVAr . وعلى مقياس الـ MVA . يكون نصف القطر OY_1 . وهو نصف قطر دائرة الاثارة التي تعطي الفولتية المقننة عند الدائرة المفتوحة . مساويا بالتقريب الى حاصل ضرب القدرة المقننة بالـ MVA مع نسبة القصر في الدائرة S.C.R . وهذا يمكن بيانه كالاتي :

اذا مر تيار مقنن (1·0 بنسبة الوحدة) عند فولتية طرف مقننة (1·0 بنسبة الوحدة) . فعندئذ يكون هبوط الفولتية IX_d بنسبة الوحدة $\simeq$ التيار المقنن مقسوما على نسبة القصر في الدائرة $= 1{\cdot}0/\text{S.C.R}$. وكذلك $IX_d = IX_s$ لماكنة ذات دوار أسطواني . من الشكل 7.17 يكون الهبوط في الفولتية هذا

(أ) على طول محور القدرة Y_1Y_2 . اذا كان عامل القدرة $= 1{\cdot}0$. اي انه يمثل قدرة 1·0 بنسبة الوحدة

(ب) على طول محور القدرة المتفاعلة (MVAr) . X_1X_2 اذا كان عامل القدرة $= 0$. وهذا يعني انه يمثل مزرة متفاعلة مقدارها 1·0 بنسبة الوحدة

(ج) على طول Y_1P اذا كان عامل القدرة $\text{p.f.} = \cos\phi$ وهي الحالة العامة . وتمثل قدرة MVA مقدارها 1·0 بنسبة الوحدة

واذا اخذنا مسافة على مقياس الفولتية مقدارها 1/S.C.R بنسبة الوحدة فانها تمثل القدرة المقننة MVA . أو بالعكس فان فولتية مقدارها 1·0 بنسبة الوحدة يتم تمثيلها بمسافة على مقياس الـ MVA بوصفها الـ MVA المقننة × نسبة القصر في الدائرة

في حالة التوليد . اذا كانت زاوية الحمل δ بين V و $\mathbf{E}_o$ (انظر الشكل 7.4) تتزايد بالتدريج بزيادة جزئية صغيرة للحمل حتى تصبح $\delta = \theta$. عندئذ فان اي زيادة اخرى في القدرة الداخلة والتي تسبب زيادة δ خارج قيم θ . سوف تسبب هبوطا في القدرة الخارجة . عليه فان دوار الماكنة سوف يدور بتعجيل ويخرج عن التزامن بسبب

الاختلاف في القدرة . الحالة تكون مشابهة اذا اشتغلت الماكنة محركا فالزاوية بين V و E_o تتزايد الى ($\pi-\theta$) − . فعندها يمكن الوصول الى حدود الاستقرارية مرة اخرى . لذا فأن الخط المنقط الموازي لمحور القدرة في الشكل 7.18 يمثل حد الاستقرارية للحالة المستقرة .

ان الدخل المركب اوالقدرة المتولدة لكل طورمن المدور الابتدائي الى المنوب تحت ظروف الحالة المستقرة يكون (راجع الفقرة 1.2.3 والملحق 4)

$$\mathbf{S}_1 = P_1 + \mathrm{j}\,Q_1 = \mathbf{E}_o\mathbf{I}^* = \mathbf{E}_o\left(\frac{\mathbf{E}_o - \mathbf{V}}{\mathbf{Z}_s}\right)^*.$$

والقدرة الداخلة / طور P_1 تكون

$$P_1 = \frac{E_o}{Z_s}(E_o \cos\theta - V\cos(\theta+\delta)) \qquad [7.5]$$

اذا كانت $\mathbf{E}_o$ هي المطاور المرجع . $\mathbf{V} = V\underline{/-\delta}$ و $\mathbf{Z}_s = Z_s\underline{/\theta}$. وبالاسلوب نفسه تكون القدرة الخارجة المركبة / الطور

$$\mathbf{S}_2 = P_2 + \mathrm{j}\,Q_2 = \mathbf{V}\mathbf{I}^*$$

$$P_2 = \frac{V}{Z_s}(E_o\cos(\theta-\delta) - V\cos\theta). \qquad [7.6]$$

ان المعادلتين [7.5] و[7.6] واللتين تختلفان بالمفاقيد النحاسية للساكن / طور I^2R ، توضحان حقيقة انه اذا تغيرت δ . فان اعظم قدرة داخلة اومتولدة تحدث عندما $\delta = (\pi-\theta)$ درجة نصف قطرية . ولكن اعظم قدرة خارجة تحدث عندما $\delta = \theta$.

اذا امكن اهمال مقاومة الساكن R بالمقارنة مع المفاعلة التزامنية X_s . وهذه صحيحة لاغراض كثيرة ، فعليه تقلص المعادلتان [7.5] و[7.6] الى الصيغة التالية

$$P = \frac{VE_o}{X_s}\sin\delta. \qquad [7.7]$$

ان تغير القدرة مع تغير زاوية الحمل في الحالة المستقرة في اي من حالتـي التوليد أو التحريك مع بقاء الاثارة ثابتة . سيكون جيبياً تقريباً وكما موضح فـي المنحنـــي المستمر في الشكل 7.19 .

اذا ربط محرك تزامنـي له مقاومة ساكن قليلة جداً بحيث يمكن اهمالها الـــى قضبان توزيع لانهائية فولتية طورها V وتشتغل على حمل عامل قدرته متقدم . فالمخطط الطوري لهذه الحالة مرسوم في الشكل 7.20 . وللسهولة اخذت حالة الماكنـــة ذات الدوار الاسطوانـي غير المشبع . مع ان المحركات التزامنية تكون بصورة عامـــة ذات دوار باقطاب بارزة . اذا كانت الماكنة تعمل في حالة اللاحمل وكانت مفاقيدهـا مهملةً . فان ال ق . د . ك E المتولدة في الطور بسبب ملفات اثارة الدوار المتغذية مـن مصدر للتيار المستمر ستقع على طول OY . واذا كانت الاثارة من الشدة بحيث تكون $E > V$ فان التيار سيتقدم على V بالطور بزاوية $\pi/2$ درجة نصف قطرية . امـا اذا كانت $E < V$ فسيتأخر التيار عن V بزاوية $\pi/2$ نصف قطرية .

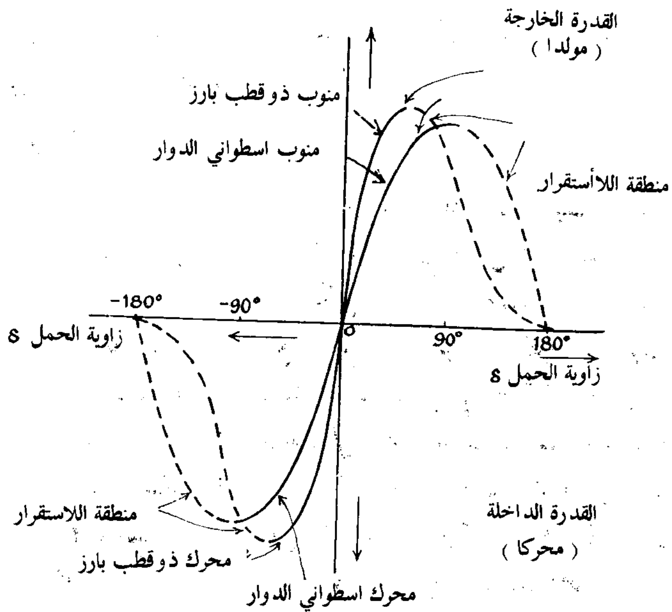
عندما يزداد الحمل الميكانيكـي على الماكنة ليجرها الى الحالة المبينةفي الشكل 7.20 فمن الممكن ان محور القطب للدوار ينحرف للخلف عن محوره الاصلـي بزاوية تساوي زاوية الحمل δ من موضع اللاحمل . ان قدرة المحرك تكون $VI\cos\phi$ وحيث ان $IX_s\cos\phi$ تساوي $E\sin\delta$. وهذا ما يمكن ملاحظته في الشكل 7.20 . لذلك فمن المكن اعادة كتابة هذه القدرة كالاتـي

$$\frac{VIX_s\cos\phi}{X_s} = \frac{VE\sin\delta}{X_s}.$$

وعليه فان التغير في القدرة مع زاوية الحمل يكون نفسه فـي حالـة اشتغال الماكنـة مولداً او محركاً (المعادلة [7.7]) ، وهذا ماموضح في الشكل 7.19 ، حيث ان القيم السالبة للزاوية δ . تطبق لحالة اشتغال الماكنة محركاً ، اي عندها تكون E متأخرة في الطور عن V .

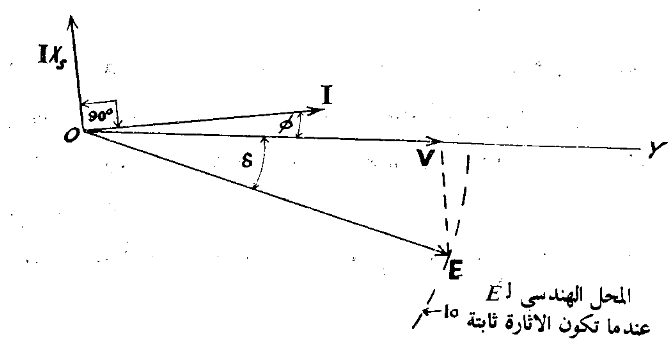
اذا جهز منوب قدرة P الى محرك تزامنـي خلال دائرة خارجية تكون

$$P = \frac{E_o E\sin\delta}{X}$$



الشكل 7.19 تغير القدرة في الحالة المستقرة مع زاوية الحمل لحالتي التوليد والتحريك لمكائن ذات دوار اسطواني ومكائن ذات دوار بارز القطب .

حيث ان E_o و E يمثلان مرة اخرى الـ ق . د . ك للطور للمنوب والمحـــرك على التوالـي . اما δ فهـي الزاوية بين E_o و E وان X هـي مجموع المفاعلات التزامنية للمكائـن ومفاعلة الدائرة الخارجية (والتي افترضت مقاومتها مهملـــة بالمقارنة مع مفاعلتها) .



الشكل 7.20 المخطط الطوري لمحرك تزامني ذي دوار اسطواني يشتغل بعامل قدرة متقدم

ان P . وهـي القدرة الخارجة من منوبـبارز القطب تكون فيه مقاومة ملفات الساكن مهملة بالمقارنة مع مفاعلته التزامنية . يمكن استخراجها اما بالطريقة التـي استخدمت للماكنة ذات الدوار الاسطوانـي نفسها . أو من المخطط الطوري المبيـن في الشكل 7.8 (مع $R = 0$) . ولما كان (من الشكل 7.8)

$$I \cos \phi = I_q \cos \delta + I_d \sin \delta,$$
$$V \cos \delta = E_o - I_d X_d \quad \text{and} \quad V \sin \delta = I_q X_q$$

والتعبير عن القدرة يمكن اعادة كتابته كالاتـي

$$\begin{aligned} P &= V(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta) \\ &= V\left(\frac{V \sin \delta}{X_q} \cos \delta + \frac{(E_o - V \cos \delta)}{X_d} \sin \delta\right) \\ &= \frac{V E_o \sin \delta}{X_d} + V^2\left(\frac{\sin \delta \cos \delta}{X_q} - \frac{\sin \delta \cos \delta}{X_d}\right) \\ &= \frac{V E_o \sin \delta}{X_d} + \frac{V^2 (X_d - X_q) \sin 2\delta}{2 X_d X_q}. \end{aligned} \qquad [7.8]$$

بالمقارنة مع المعادلة [7.7] يتبين ان هناك حداً اضافياً يمثل العزم المعاوق الناتج البروزات الموجودة في الدوار . كما يتبين مـن الشكـل 7.19 . تحدث الان اعظم قدرةعند زاوية اقل من $\pi/2$ درجة نصف قطرية . وعليه فان الماكنة ذات الاقطـاب البارزة تكون أكثر'صلابة' ·وأكثر استقرارية من المكائـن ذات الدوار الاســطوانـي .

في الحقيقة لايمكن ان تشغل ماكنة ذات دوار اسطواني عند حدود الاستقراريـة للحالة المستقرة او قريباً منها جداً اي عندما تكون $\delta \simeq \pm\pi/2$. وهــذا يعود الى انها تطبق على الحالات المثالية فقط للمنظومات التي لايحدث فيها اي تغير في الربط أو اي خلل في العمل . وكذلك يكون حدوث تغير الاحمال فيها بطيئاً جداً ان التغير المفاجـيء في الحمل . وفصل أو توصيل اي جزء من اجزاء المنظومة والاعطال . هذه جميعها قد تسبب في فقدان الاستقرارية للمنظومة الا اذا ثبتت انطقة فاصلـة (margins) على بعد كاف من حدود الاستقرارية . ان التغيرات المفاجئـة هذه . وخاصة الاعطال . قدتسبب حدوث أختلاف كبير بين القدرة الداخلة من المـدور الابتدائـي للمولد والقدرة الخارجة منه الى المنظومة . وخاصة خلال الفترة التـي تسبق حدوث فعل المتحكم الميكانيكـي .

عادة يكـون فرق القدرة هذا قدرة معجلة وذلك لـكون المولد غالباً ما يغـذي الجزء العاطل من المنظومة قدرة أقل خلال فترة العطل من تلك التـي كان يغذيها قبل حدوث العطل (مع انه في حالة العطل يغذي تياراً أكبر) . وهذا ما يسبب زيادة آنية ابتدائية مع تذبذب في دوار المنوب أو زاوية الحمل δ . ان مشكلة الاستقرارية العابرة هذه لظروف معطاة من التحميل وكذلك تغير حمل معلوم أو حدوث عطل ما وفتـرة استمراره سيتم التطرق اليه في الجزء الثانـي من هذا الـكتاب .

ان مناطق مخطط الشكل 7.18 والتـي تشتغل فيها الماكنة في امان وفـي حالة الاستقرار سوف يتم التطرق اليها في الفقرة القادمة . وفـي الفقرة التي تليهـا سوف يتم التطرق ايضاً الى الاسباب التـي تدعو الى توسيع مناطق الامان عند عوامـل قدرة متقدمة وذلك بسبب فعل منظمات الفولتية ذات الفعل السريع .

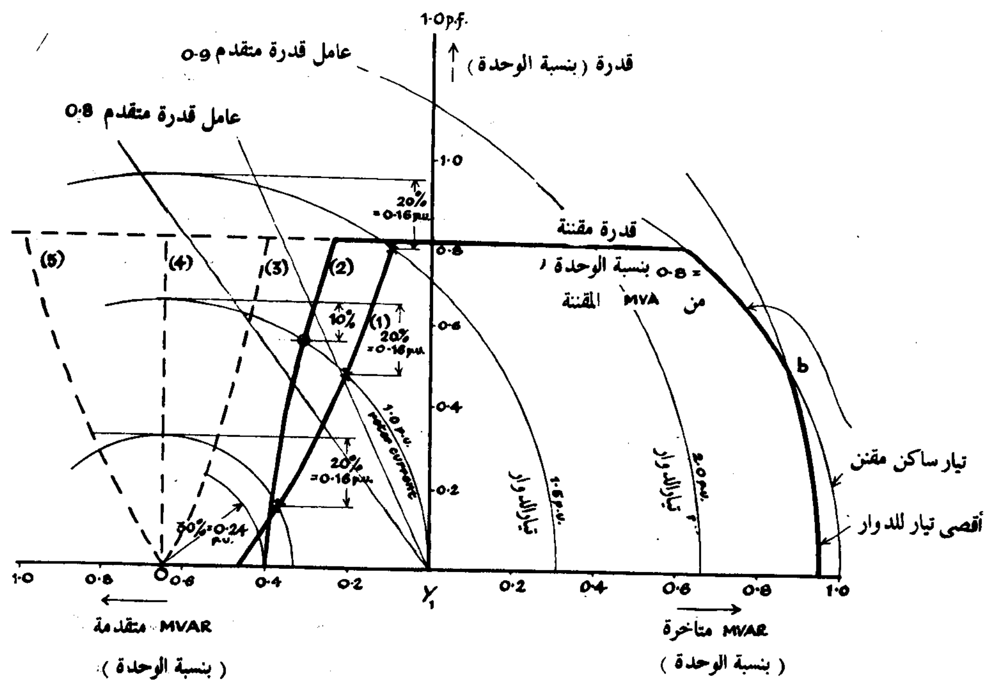
7.8 نطاق الاستقرارية وحدود الاشتغال لمنوب اسطواني الدوار .

Stability Margin and Operational Limits for a Cylindrical rotor Alternator

ان حدود مناطق مخطط القدرة الموضح في الشكل 7.18 . والتي يكون من الممكن ضمنها اشتغال منوب اسطواني الدوار بأمان تحت ظروف الحالة المستقرة . تحدد بما يلي :

(أ) القدرة المقننة MW للمدور الابتدائي .
(ب) القدرة المقننة MVA للمنوب
(ج) اقصى تيار اثارة لمجال المنوب والمثير (يحدد اعتيادياً بالحرارة المتولدة في الدوار)
(د) اللااستقرارية في منطقة عامل القدرة المتقدم .

لقد تم تحويل الشكل 7.18 من مخطط فولتية الى مخطط قدرة موضح في الشكل 7.21 ، وذلك بضرب جميع المطاورات في الشكل 7.18 بالمعامل $3V/X_s$. للحالة عندما تكون مقاومة الساكن مهملة . الشكل 7.21 يبين تفاصيل المخطط لماكنة تشتغل بعامل قدرة مقنن متأخر 0·8 (وهذا يعني ان القدرة للحمل الـكلي هـي MVA × 0·8 المقننة) وهو مرسوم للاشتغال عند فولتية الطرف المقننة . وتيار دوار مقداره واحد بنسبة الوحدة تم تبيانه كيفياً على اساس تلك القيمة التي تعطي فولتية مقننة عند حالة الدائرة المفتوحة . وعليه سيقع تيار المجال الاقصى في حدود القيمة 2·5 بنسبة الوحدة .



الشكل 7.21 مخطط يوضح حدود الاشتغال لمنوب ذي دوار اسطواني يعمل على قضبان توزيع عند فولتية طرف مقننة

هذه القيمة الاخيرة تصمم بحيث تكون تلك القيمة التي تعطي قدرة مقننة عند MVA مقننة وعامل قدرة مقنن . في هذه الحالة . سيقطع المنحني الذي يمثل اقصى تيار للدوار خط الـ MW المقننة في النقطة نفسها التي يكون عندها مقطوعاً بمنحني تيار الساكن المقنن (الذي يكون Y_1 مركزاً له) . وذلك لكي تضمحل حدود منطقة الاشتغال ab الى الصفر بسبب حدود الـ MVA . ان مركز دوائر الاثارة O . كما تم شرحه في الفقرة 7.7 ، يمكن اخذه بحيث يكون زاحفاً على محور الـ MVAr من Y_1 بكمية مساوية تقريباً للـ MVA المقننة × نسبة القصر في الدائرة . بحيث تكون نسبة القصر في الدائرة في الشكل 7.21 حوالي 0·65 .

ان مناطق الاشتغال الأمينة تكون ضمن الخطوط الثقيلة المحددة بالقدرة المقننة في الاعلى . وبين أعظم تيار للدوار (وربما تيار الساكن المقنن) على جهة اليمين . أما حدود جهة اليسار فتعتمد على الطريقة المستخدمة لتنظيم الفولتية .

ان الحدود المؤشر عليها بالعلامة (1) يمكن الحصول عليها كالاتي : ارسم دوائر اثارة بمركز O : وفي الشكل 7.21 رسمت هذه الدوائر لـ 0·5 . 1·0 . 1·5 و 2·0 بنسبة الوحدة . ارسم خطوطاً موازية للـ MVAr الاساس ومماسة لكل دائرة عند نقطة اعظم قدرة . أعط الان سماحاً مقداره 20 % من القدرة المقننة لكل قيمة من قيم القدرة العظمى . وبتعبير اخر . اذا كانت القدرة المقننة هنا هي 0·8 بنسبة الوحدة . فارسم مجموعة اخرى من الخطوط موازية للاولى وتكون اسفلها بقيمة 0·16 بنسبة الوحدة من القدرة المقننة . عندما نرسم خطاً يربط نقاط تقاطع هذه الخطوط الجديدة مع دوائر الاثـارة المناسبة لكل منها فانه سيعطي الحدود المؤشرة بالعلامة (1) . في الحقيقة عند استخدام سيطرة يدوية على المثير يسمح بنطاق فاصل مقداره 20 % في حالة الحمل الكلي . وقد يزداد هذا الى 35 % عند الاحمال الخفيفة . وسبب ذلك يعود الى ان امكانية الزيادة الجزئية في الاحمال الصغيرة تزيد على تلك التي في الاحمال الكبيرة . وهذا النوع من الانطقة الفاصلة موضح في المنحني (2) للقيم المختلفة من الانطقة الفاصلة والتي سنأتي على ذكرها لاحقاً .

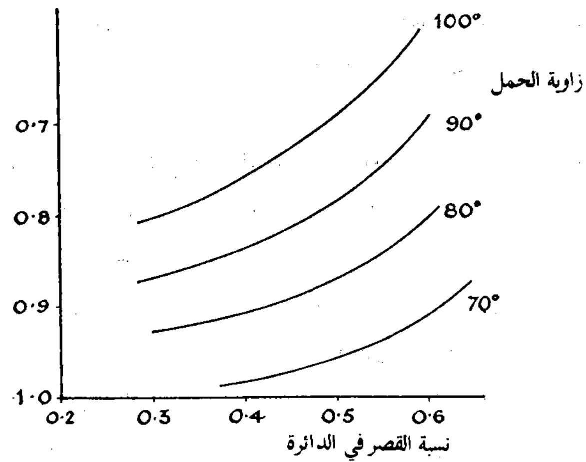
تطبق الحدود (2) اذا استخدمت منظمة فولتية ذاتية غير فعالة بصورة دائمة . حيث يؤخذ 10 % نطاقاً فاصلاً للقدرة المقننة عند الحمل الكلي و30 % نطاقاً فاصلاً عند الحمل الخفيف . لذلك فان التغير من تحكم اوسيطرة يدوية الى منظمة الفولتية الذاتية هذه سوف يسمح بالاشتغال في المنطقة المحددة بالمنحنيين (1) و(2) وخط الـ MW المقننة .

مما يجب ملاحظته أن الشكل 7.21 يطبق على الاشتغال عندما تكون فولتية الطرف الفولتية المقننة . فاذا زادت فولتية الطرف عن هذه القيمة فان نطاق الحدود (1) و(2) يتحرك نحو اليسار ، واذا قلت الفولتية سيتحرك نحو اليمين .

ان الحد الثاني من المعادلة [7.8] يمثل ، لمنوب ذي اقطاب بارزة . عزماً لايعتمد على الاثارة عند الاشتغال على قضبان توزيع لانهائية . ان مثل هذه الماكنة يمكن ان تجهز حوالي 25 % من قدرتها المقننة بدون اثارة الـ d.c. . والمساحة التي تمثل الاشتغال بعامل قدرة متقدم في الشكل 7.21 ، والتي عندها تشتغل الماكنة بامان ، تكون اكبر من تلك لماكنة ذات دوار اسطواني .

ان الاختبارات الفعلية لمنوبات مربوطة الى شبكة المنظومة الكبرى والتي اجريت من قبل (Mason, Aylett and Birch, 1959) قد أوضحت ان المكائن يمكن لها

في الحقيقة ان تشتغل الى الخط رقم (3) في الشكل 7.21 باستعمال تحكم يدوي . ولغاية الخط رقم (4) باستخدام متحكمات فولتية غير فعالة . وعليه تكون الانطقة الفاصلة المستعملة أمينة جداً .



الشكل 7.22 تأثير الاشتغال عند عامل قدرة متقدم وبزاوية حمل كبيرة على نسبة القصر في الدائرة .

وأثبتت الاختبارات الي اجريت على استخدام منظم فولتية مستمر الفعل ان الماكنة تستطيع الاشتغال بدون فقدان التزامن حتى عند الخط (5) الموضح في الشكل 7.21 . عليه فالذي يظهر هو امكانية تشغيل منوب عند زوايا حمل تصل على الاقل الى 90 ويبقى فيها محافظاً على نطاق استقرارية معقول . اذا مااستخدم منظم فولتية مستمر الفعل سوية مع محددات القدرة المتفاعلة المتقدمة حيث ان الاخير يمنع الهبوط الشديد في الاثارة في حالة ارتفاع مفاجيء لفولتية المنظومة .

وكما يوضح الشكل 7.22 . فأن الأشتغال في زوايا حمل أكبر لحدود معينة من عامل القدرة المتقدم . يمكن من تصميم ماكنة ذات قيمة قليل لنسبة دائرة القصر . ان هذه المزايا وكذلك الأسباب التي تجعل هذا الأشتغال ممكنا باستخدام منظمات الفولتية ذات الفعل المستمر . ستناقش باسهاب في الفقرة القادمة .

7.9 الاشتغال عند عامل قدرة متقدم مع منظمات فولتية ذاتية سريعة ومستمرة الفعل .

Operation at Leading Power Factor with Fast Continuously acting Voltage Regulators

اذا استعملت منظمات فولتية ذاتية مستمرة الفعل . فمن الممكن تشغيل منوب بامان بعوامل قدرة متقدمة وواطئة القيمة نسبياً . ويكون لهذا نتيجتان قيمتان

(أ) يمكن في هذه الحالة تقليل نسبة القصر في الدائرة الأمر الذي يجعل الماكنة ارخص ثمناً من الناحية الأقتصادية . وذلك بسبب تقليل الوزن المحسوب لكل ميكاوات من القدرة الخارجة . والاكثر خصوصا . بما ان المكائن ذات القدرة الخارجة الكبيرة تكون أكثر كفاءة . وتحدد صعوبات النقل على الطرق الوزن الأقصى الممكن نقله . فالاقتصاد في الوزن بتقليل نسبة القصر في الدائرة ينتج عنه ماكنة ذات كفاءة عالية وقدرة أكبر . ان أكبر جزء من العضو الساكن لمنوب رباعي القطب بقدرة 1350 MVA والمصدر الى الولايات المتحدة سنة 1976 يزن 310 طن . وفي بعض البلدان تستطيع مركبات سكك الحديد من نقل 420 الى 550 طنا ولها سعة قصوى قد تصل الى 600 طن . ولقد جعل استخدام منظمات الفولتية ذات الفعل السريع وذات الحساسية الدقيقة (التي تكون فيها منطقة اللاحساسية مهملة عند رسم خواصها) بالأمكان تقليل نسبة القصر في الدائرة بحوالي 0·5 لمولدات بعوامل قدرة متأخرة 0·9 أو 0·85 مربوطة الى منظومة بفولتية مقدارها 275 كيلو فولت . وزيادة على هذا فأن الأساليب المتقدمة والحديثة الكثيرة مثل تبريد السلاكن والدوار بوساطة الهيدروجين . والتبريد المائي الداخلي لموصلات الساكن . وكذلك الحديد الصلب ذو النوعية العالية جعل من الممكن تصميم مكائن ذات قطبين بقدرة من 1300 الى 2000 MW . تعمل بزوايا حمل لحد 80 تقريباً . ان التطويرات الحديثة في تصاميم المولدات اللاأخدودية (slotless generators) او المولدات ذات التوصيل الفائق قد أظهرت امكانية تصنيع مكائن بقدرات تتراوح بين 2000 MW و 10 000 MW

(ب) ان استخدامها يساعد على اشتغال بعض محطات التوليد عند عامل قدرة متقدم في حالات معينة من التحميل والتي ظهرت حديثا من استخدام منظومات نقل بفولتيات عالية مثل 275 kV أو 400 kV حيث ان بعض القابلوات الطويلة نسبيا تحتاج الى قدرة شحن (kVA) كبيرة نوعا ما . او خلال فترة الليل عندما يكون الحمل على الخطوط خفيفاً .

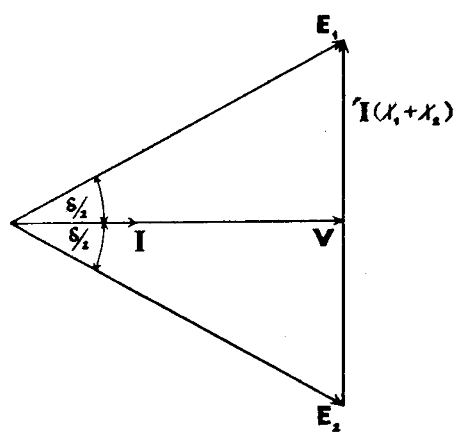
ان تأثير منظم الفولتية ذي الفعل السريع على اطلاق الماكنة من حدود الأستقرارية الطبيعية يمكن ملاحظته من خلال التحليلات التقريبية والمبسطة التالية . ان ماكنة مفردة ذات دوار مدور الشكل مربوطة الى قضبان توزيع لانهائية خلال خط . تكون مكافئة الى ماكنتين ذات دوار دائري الشكل مربوطتين بعضهما ببعض ويكون هذا صحيحاً عندما يهمل تأثير تيار الدوار . أي ان هناك تكافؤ عند الحالة المستقرة . واذا كانت E_1 هي القوة الدافعة الكهربائية و X_1 هي المفاعلة التزامنية للماكنة المصدرة . فأن E_2 تكون أما فولتية قضبان التوزيع اللانهائية أو القوة الدافعة الكهربائية للماكنة التي تعمل محركاً . و X_2هي مفاعلة الخط او المفاعلة التزامنية للماكنة التي تعمل محركا .

ان تدفق القدرة P في الطور الواحد (من الشكل 7.23) يكون $IE_1 \cos(\delta/2)$ وكذلك

$$I = \frac{2\,E_2 \sin(\delta/2)}{(X_1+X_2)}$$

$$P = \frac{E_1E_2}{(X_1+X_2)} 2\sin(\delta/2)\cos(\delta/2)$$

$$= \frac{E_1E_2 \sin\delta}{(X_1+X_2)}. \qquad [7.9]$$



الشكل 7.23 المخطط الطوري لماكنة مفردة مربوطة الى قضبان توزيع لانهائية خلال خط . أوماكتتين مربوطتين بعضهما ببعض

اذا فرض للسهولة كون $X_1 = X_2 = 1\cdot0$ بنسبة الوحدة . وان الأثارة قد تركت ثابتة عند القيمة التي تعطي التيار المقنن وهذا يعني ان $I_f = 1\cdot0$ بنسبة الوحدة عند عامل قدرة واحد وفولتية طرف مقننة $V = 1\cdot0$ بنسبة الوحدة . عليه يتبين من الشكل 7.23 ان

$$E_1 = E_2 = 1/\cos 45^\circ = \sqrt{2}$$

بحيث انه من المعادلة [7.9]

$$P = \sin \delta \qquad [7.10]$$

وهذه تعطي حدود القدرة في الحالة المستقرة بحيث تكون $P = 1\cdot0$ عند $\delta = 90^\circ$. والمنحني الجيبي للماكنة ذات الدوار الأسطواني يكون كما موضح في الشكل 7.19 .

على أية حال . اذا تم تنظيم جهاز الأثارة آنياً وبصورة ثابتة بوساطة منظم فولتية سريع الفعل الذي يبقي فولتية الطرف عند القيمة 1·0 وكذلك عامل القدرة عند القيمة 1·0. فعليه تكون $E_1 = E_2 = 1/\cos(\delta/2)$ من الشكل 7·23 . ومن المعادلة [7.9]

$$P = \frac{\sin \delta}{2\cos^2(\delta/2)} = \tan(\delta/2) \qquad [7.11]$$

بهذا فان انتقال [illegible] الآن قد زاد بصورة مستمرة عندما زادت δ من صفر الى 180 بدلاً من النقصان عندما تتجاوز قيمة δ 90° . واذا تمت زيادة الحمل بمقادير متدرجة صغيرة جداً وتم تنظيم الاثارة مع كل زيادة بحيث يرجع V الى 1·0 بنسبة الوحدة فأن اختبار استقرارية المنظومة بالطرق المعتادة (أي التحقق فيما اذا زاد أوقل تدفق القدرة عندما تكون هناك زيادة صغيرة في قيمة δ في حالة الأثارة الثابتة) قد بين ان المعادلة [7.10] تطبق في هذه الحالة بدلا من المعادلة [7.11] . عليه . فمن الناحية المثالية يجب ان يكون لمنظم الفولتية عامل تكبير غير محدود (لانهائي) . ويجب أن لايكون أي تأخير زمني سواء في المنظم أوجهاز الأثارة أومجال الماكنة الرئيسي .

لهذا الغرض فمن المعتاد ان تستعمل شبكة ستاتيكية تمثل جهاز تحسس الفولتية . ليغذي اشارة كهربائية الى مضخم ستاتيكي . وعلى المحور الرئيسي للماكنة قد يكون هناك ثلاثة

اجهزة للاثارة : اما مولد ذو مغناطيس طبيعي تقوم فولتيته الخارجة المقومة بتغذية مجال جهاز اثارة التيار المتناوب المرشد . وهذا بدوره يقوم بتقويم الفولتية الخارجة لتجهز مجال جهاز الاثارة المتناوب الرئيسي . في الدائرة الاخيرة هذه تصل الاشارة الخارجة من دائرة تحسس الفولتية عن طريق مضخم مغناطيسي . من الشائع استخدام انصاف الموصلات السليكونية كالثنائيات والثايرسترات لغرض اتمام عملية تقويم الفولتيات الخارجة ويشمل ذلك مابين المثير المتناوب الرئيسي ومجال المنوب . حيث ان القدرة قد تزيد عن 2 MW لماكنة 500-MW . في بعض الحالات تستخدم مثيرات a.c. ذات منتج دوار سوية مع ثنائيات موضوعة داخل محور مجوف . وبهذه الطريقة يمكن التخلص من عملية صيانة الفرش الكاربونية .

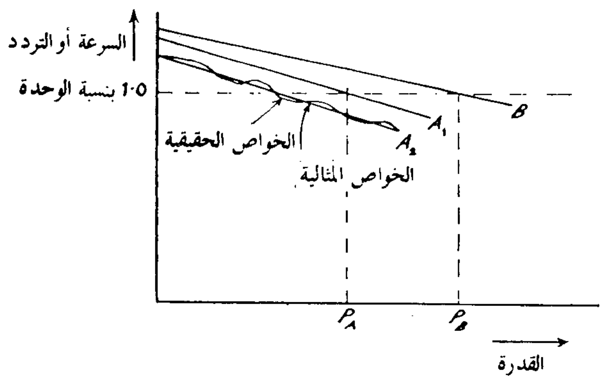
7.10 المتحكمات والسيطرة على التردد

Governors and Frequency Control

في اي منظومة قدرة . من الضروري السيطرة على انسياب القدرة الفعالة والقدرة المتفاعلة (vars) . وكذلك على مقادير الفولتيات . ان القدرة الداخلة للشبكة تعتمد على القدرة الداخلة للمدور الابتدائي . وهذه القدرة يسيطر عليها آلياً بوساطة تنظيم المتحكم . تشتغل محطات القدرة الاكثر كفاءة (محطات الحمل الأساس) 24 ساعة يومياً باحمال عند قيمتها المقننة أوقربها . بينما المحطات الاقل كفاءة نسبيا تشتغل باحتياطي سعة التوليد (الاحتياط الدائر) ، والمحطات الاخرى تربط بالقضبان كلما ازداد الحمل وبتسلسل يعتمد على كفاءتها الاقتصادية . واذا كانت كل من مسافات النقل والمفاقيد كبيرة فمن الممكن ايجاد تحليل أمثل لاستخدام المحطات وتسيير القدرة . باستخدام دراسات الحاسبة الالكترونية . مع انه ضمن اعتبارات اخرى مثل انطقة الاستقرارية الفاصلة عند خروج الخطوط نتيجة الاعطال أوغيرها . تكون تلك الاعتبارات سببا في جعل الظروف الاقتصادية المثالية غير عملية . ويمكن السيطرة على انسياب القدرة المتفاعلة (vars) في المنظومة بوساطة تغيير الاثارة للمولدات وكذلك بوساطة تغيير مآخذ التغيير في المحولات .

عندما يجهز مولد منفرد حملا ما . فان التردد يسيطر عليه بمتحكم المدور الابتدائي . حيث انه يحافظ على ثبوت السرعة بتغيير القدرة الميكانيكية الداخلة . وهذا المتحكم يجب ان يمتاز بان خواصه التي تمثل العلاقة بين السرعة والقدرة الخارجة يكون انخفاضها

قليلا لضمان الاستقرارية . ان السرعة والتردد لاي حمل معين يمكن تغييرهما برفع او خفض هذه الخواص بوساطة مبدل سرعة المتحكم . هذا موضح في الشكل 7.24 حيث ان A_1 وA_2 يمثلان تنظيمات مختلفة لمبدل سرعة الماكنة A . فاذا زادت الاثارة . بدون اي زيادة في قدرة المدور – الابتدائي الداخلة . فالزيادة التي ستحصل في الفولتية والقدرة الخارجتين تؤديان . بالمتحكم الى خفض التردد وبالتالي الى خفض الفولتية . وستستقر الحالة الى ان يعود الاشتغال الى الفولتية الاصلية ولكن بتردد اقل . اما القدرة المتفاعلة (vars) المجهزة فستتغير طالما كان هناك تغير في التردد فقط . ولهذا السبب فان التغير في كمية الاثارة يكون له تأثير صغير على عامل القدرة للماكنة . هذا يختلف تماما عن تغير الاثارة على ماكنة تشتغل على التوازي مع ماكنة تزامنية اخرى .



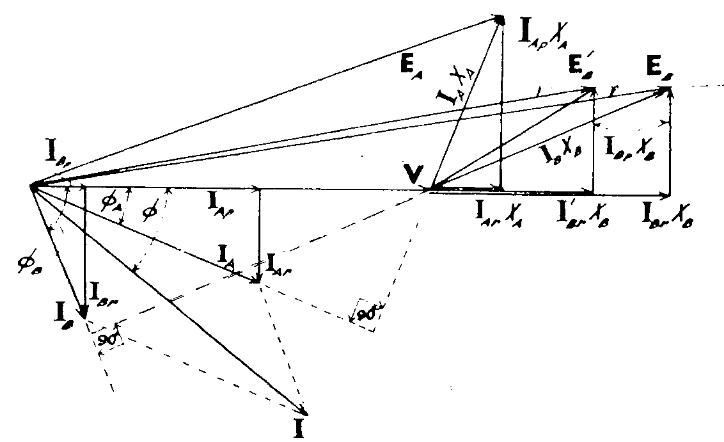
الشكل 7.24 تغير التردد مع القدرة الخارجة

عندما تشتغل عدة مكائن على التوازي مع بعضها فيجب ان يكون التردد لكل هذه المكائن متساويا . والشكل 7.24 يبين حالة لماكنتين A و B مربوطتين على التوازي . فاذا كان تنظيما متحكميهما A_1 ، B . فعندها تشتغل هاتان الماكنتان عند تردد مقداره 1·0 بنسبة الوحدة (50 هرتز في بريطانيا*) وستجهزان قدرتين P_A و P_B على التوالي . وتجهز الماكنتان A و B . المربوطتان على قضيب توزيع فولتيته V للطور الواحد . حملا يكون ثابتا عند جعل القدرة الداخلة للمدور الابتدائي ثابتة كذلك . ان مركبات التيار $I_{Ap} = I_A \cos \phi_A$ و $I_{Bp} = I_B \cos \phi_B$ تكون في الطور نفسه مع

* التردد في العراق هو 50 هيرتز ايضا (المترجمان)

فولتية قضيب التوزيع ويجب ان تبقى هذه المركبات ثابتة اذا استمرت القدرة الداخلة للمدورين الابتدائيين ثابتة . ما دامت فولتية الطرف V ثابتة أيضاً .

اذا كان للماكنتين مفاعلتان تزامنيتان لكل طور مقدارهما X_A و X_B . ومقاومة ساكنيهما مهملة . فتكون القوى الدافعة الكهربائية لهاتين الماكنتين عند عاملي قدرة $\cos \phi_A$, $\cos \phi_B$. (أو ما تسمى في بعض الاحيان بالفولتيات خلف المفاعلة التزامنية) هي $\mathbf{E}_A$ و $\mathbf{E}_B$ كما موضحة في الشكل 7.25 . ولأن $I_{Ap}X_A$ و $I_{Bp}X_B$ يجب أن تبقيا ثابتتين . لقدرة ثابتة داخلة الى المدور الابتدائي . فان أي تغير في اثارة أحدى الماكنتين يؤدي الى تحرك ال ق . د . ك المتولدة على مسار موازٍ لمطاور فولتية الطرف $\mathbf{V}$.



الشكل 7.25 المخطط الطوري لمولدين ذوي دوارين اسطوانيين مربوطين على التوازي

واذاهبطت أثارة الماكنة B بحيث تصبح قيمة ال ق. د. ك لها $\mathbf{E}'_B$. فسوف يكون هناك نقصا في تجهيز القدرة المتفاعلة من هذه الماكنة بما قيمته $V(I_{Br}-I'_{Br})$ لكل طور .

اذا كانت هاتان الماكنتان مربوطتين فقط الى حمل له ممانعة ثابتة . عندئذ تحـــاول الماكنة A تجهيز النقص في ال vars الحادث في الماكنة B . اذا بقيت أثارة الماكنة A ثابتة . فأن الزيادة التي تحدث في ال vars أي في $I_{Ar}X_A$ ستؤدي الى تحرك $\mathbf{E}_A$ على قوس دائرة وبالتالي الى انخفاض قيمة I_{Ap} . وعليه سيكون هناك ميل الى انخفاض

كل من قدرة الحمل وفولتية الطرف. ممايؤدي الى حدوث زيادة جزيئية في التردد بمقدار يعتمد على خواص المتحكم نفسه. ان من الممكن ارجاع الفولتية والقدرة الى مستوييهما الأصليين وذلك بزيادة الأثارة في الماكنة A بحيث يحدث انتقال في القدرة المتفاعلة من الماكنة B الى الماكنة A. من الطبيعي ان المولد يكون مربوطاً بصورة فعلية الى « قضبان توزيع لانهائية » عليه فأن فولتية الطرف $\bar{V}$ وترد د المنظومة سوف لايتأثران ظاهرياً بالتغير الحاصل في أجهزة الأثارة أو القدرة المجهزة لماكنة معينة . لهذا السبب سوف لاتتأثر الماكنة A بالأنخفاض الحاصل في اثارة الماكنة B . عليه فأن الأثارة تتحكم فقط في الـ vars الخارجة من المولد المأخوذ بنظر الأعتبار . بينما يسيطر متحكم السرعة على القدرة الخارجة بوساطة تغيير مواضع الصمام المتحكم في كمية البخار نفسه . أن مجمل القدرة المتفاعلة (vars) المطلوبة للمنظومة بأكملها يأتي من محطات التوليد المربوطة اليها . واذا وجد في محطة ما عدد من المولدات لها عامل القدرة المقنن نفسه . فسوف تقتسم هذه المولدات الـ vars بنسبة قدراتها المقننة محتفظة بقيمة معينة لفولتية قضبان التوزيع . وهذا يحدث تلقائياً بوساطة منظمات الفولتية .

تستعمل المنظمات المركبة التي تعتمد في تشغيلها على التيار الى جانب الفولتية لهذا الغرض . ويعزى سبب ذلك الى أن أي منظم يعمل مباشرة عند حدوث تغير في فولتية قضيب التوزيع سوف يؤدي الى جعل المولد المربوط اليه يتخلى عن أو يأخذ جزءاً غير متناسب من التغير في القدرة المتفاعلة (vars).. وكلما ازدادت المفاعلة الموجودة بين مجموعة من المكائن في محطات توليد مختلفة قل تأثير اثارةالماكنة الواحدة على توزيع القدرة المتفاعلة فيما بينها . وقد يعطي مأخذ التغيير الموجود على المحولات التي تربط مابين هذه المحطات سيطرة فعلية على اقتسام كمية القدرة المتفاعلة (vars) في عموم المنظومة.

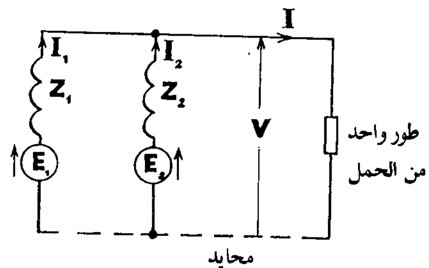
مثـــال محـلول 7.4

منوبان ثلاثيا الطور يعملان على التوازي لهما أثارة بحيث ان فولتيتيهما في حالة الدائرة المفتوحة هما E_1 و E_2 . ومفاعلتيهما التزامنيتين Z_1 و Z_2 . جهزا تيار حمل لكل طور مقداره I . اوجد تمثيلا رياضيا للتيارين I_1 و I_2 في كل من المنوبين .

منوبان توربينيان ثلاثيا الطور ومتماثلان قدرة كل منهما 5000-kVA بفولتية 6·6 ك. ف يعملان على التوازي متساويا الأثارة ويقتسمان بالتساوي حملا قدره 8000 kW بفولتية 6·6 ك.ف وعامل قدرة متأخر 0·8. أحسب الاثارة اللازمة بدلالة الاثارة في حالة اللاحمل عند الفولتية المقننة لكل من هذين المنوبين بفرض أن المفاعلة التزامنية

لـكل طور تكون ثابتة ومقدارها 2·0 بنسبة الوحدة واهمال مقاومة ملفات الساكـن .

اذا استوجب تقليل اثارة احد المنوبين بنسبة 15% . فاوجد كم من اللازم زيادة فولتية الأثارة للمولد الآخر. بحيث نتجنب أي تغير في فولتية الطرف وكمية البخار المجهز لكل من هذين المولدين . (جامعة لندن) .



الشكل 7.26

الحـل :

لتكن V فولتية الطرف عبر طور واحد من الحمل

$$I_1 = (E_1 - V)/$$

وكذلك

$$I_2 = (E_2 - V)/Z_2.$$

$$I = I_1 + I_2$$

$$I = \frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} - V\left[\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}\right]$$

$$V = \frac{Z_1 Z_2}{(Z_1 + Z_2)}\left[\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} - I\right]$$

$$I_1 = \frac{E_1}{Z_1} - \frac{Z_2}{(Z_1 + Z_2)}\left[\frac{E_1}{Z_1} + \frac{E_2}{Z_2} - I\right] = \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2} + I\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

وبالأسلوب نفسه

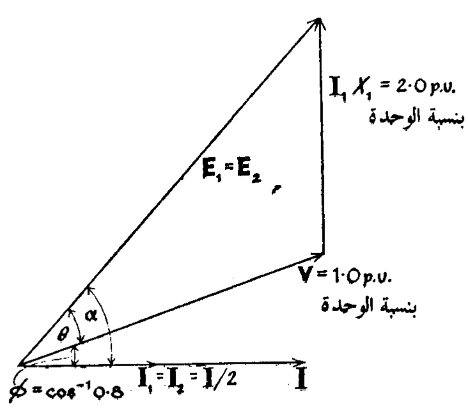
$$I_2 = \frac{E_2 - E_1}{Z_1 + Z_2} + I\frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}.$$

الحدان الأوليان من هاتين المعادلتين يعطيان التيار $\mathbf{I}_c$ الذي يدور خلال الدائرة الموضعية بين ملفات الساكنين . أما الحدين الآخيرين فهي حصة كل من المولدين من تيار الحمل الكلي اذا كان كلا المولدين لهما الـ ق . د . ك نفسها . ولم يكن هناك أي تيار دوار في الدائرة المشتركة .

بصورة عامة . يمكن ايجاد أقتسام الحمل بين هذين المولدين من هذه المعادلات . ولكن في هذه الحالة يقتسم هذان المولدان الحمل بالتساوي بحيث أن $\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_2 = \mathbf{I}/2$. ولما كانت اثارتهما متساوية فعليه تكون $\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2$.

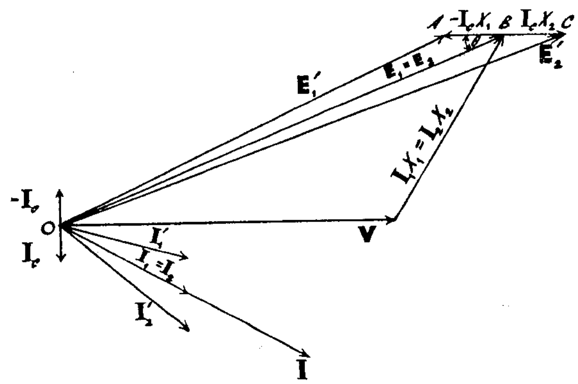
$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{E}_2 = [(1\cdot0\times0\cdot8)^2+(1\cdot0\times0\cdot6+2\cdot0)^2]^{\frac{1}{2}}$$
$$= (0\cdot8^2+2\cdot6^2)^{\frac{1}{2}} = 2\cdot72,$$

عليه تكون الأثارة اللازمة لهذا الحمل هي $2\cdot72$ مضروبة بتلك القيمة اللازمة لأعطاء فولتية مقننة $1\cdot0$ بنسبة الوحدة (وهذا يعني $6600/\sqrt{3}$) لكل طور في حالة الدائرة المفتوحة . بالطبع فأن هذا مبني على فرض ان التشبع مهمل . وهومايستوجب فعله اذا كانت المفاعلة التزامنية ثابتة كما تم ذكرها في هذه المسألة .



الشكل 7.27

عندما تقلل اثارة الماكنة 1 بحيث تكون $E'_1<E'_2$ فالتيار الدوار ($\mathbf{I}_c = (\mathbf{E}'_2-\mathbf{E}'_1)/2X$. حيث ان $X = X_1 = X_2$) . ينساب خارج الماكنة 2 و $-\mathbf{I}_c$ ينساب خارج الماكنة 1 . هذا يعني ان $\mathbf{I}'_1 = \mathbf{I}/2-\mathbf{I}_c$ وكذلك $\mathbf{I}'_2 = \mathbf{I}/2+\mathbf{I}_c$



الشكل 7.28 .

اذا لم يتغير تجهيز البخار لاي من المدورين الابتدائين . فان هذا التيار I_c يجب ان يكون متعامداً مع فولتية الطرف V . ويبين الشكل 7.28 تأثير انخفاض E_1' الى $0{\cdot}85\,E_1$. ومن الشكل 7.27 . تكون $\theta = \alpha - 36°\ 52'$ و $\alpha = \sin^{-1}(2{\cdot}0+0{\cdot}6)/2{\cdot}72 = 72°\ 57'$ عندها تكون $\theta = 36°\ 5'$.

في الشكل 7.28

$$OB = 2{\cdot}72 \text{ p.u.}$$

$$OA = 0{\cdot}85 \times 2{\cdot}72 = 2{\cdot}31 \text{ p.u.}$$

وكذلك

$$AB = BC$$

$$\underline{/OBA} = \theta = 36°\ 5'$$

لذا

$$2{\cdot}31^2 = 2{\cdot}72^2 + AB^2 - 2 \times 2{\cdot}72\, AB \cos 36°\ 5'$$

$$AB = I_cX = 0{\cdot}54 \text{ p.u.}$$

$$OC^2 = (E_2')^2 = 2{\cdot}72^2 + 0{\cdot}54^2 - 2 \times 2{\cdot}72 \times 0{\cdot}54 \cos 143°\ 55' = 10{\cdot}03$$

وان

$$E_2' = 3{\cdot}17 \text{ p.u.}$$

والنسبة المئوية لزيادة ال ق . د . ك للماكنة الثانية تكون

$$100 \times \frac{3{\cdot}17 - 2{\cdot}72}{2{\cdot}72} = 16{\cdot}6\%.$$

مما تجدر ملاحظته ان البيانات المعطاة والتـي منها يتم احتساب قيم التيارات والفولتيات الحقيقية يمكن ايجادها . ولـكنها ليست مطلوبة جزماً في هذه المسألة . مع ان المخطط الطوري الموضح في الشكل 7.28 قد يساعد على بيان الظروف الا انه بالطبع ليس اساسياً في الحل . اي ان الجزء الاخير من المسألة يمكن حله كما يـلي :
خذ $\mathbf{V} = 1\cdot0/0°$ بوصفها مطاوراً مرجعاً بحيث ان $\mathbf{I}_c = 0 - \mathrm{j}\, I_c$

$$\mathbf{E}_1' = \mathbf{E}_1 - (-\mathrm{j}\,\mathbf{I}_c)(\mathrm{j}\,2) = \mathbf{E}_1 - 2\mathbf{I}_c$$
$$\mathbf{E}_1 = 2\cdot72\underline{/\theta} = 2\cdot72\underline{/36°\ 5'}$$
$$\mathbf{E}_1' = (2\cdot72\cos 36°\ 5' - 2I_c) + \mathrm{j}\,2\cdot72\sin 36°\ 5'$$
$$E_1' = 0\cdot85E_1 = 0\cdot85 \times 2\cdot72 = 2\cdot31 = [(2\cdot193 - 2I_c)^2 + 1\cdot6^2]^{\frac{1}{2}}$$

وبذلك

$$I_c = 0\cdot265 \text{ per unit}$$

$$\mathbf{E}_2' = \mathbf{E}_1 + 2\mathbf{I}_c$$
$$E_2' = [(2\cdot193 + 2I_c)^2 + 1\cdot6^2]^{\frac{1}{2}}$$
$$= 3\cdot17 \text{ per unit.}$$

وبسبب خواص الانخفاض التي يجب ان يمتاز بها كل متحكم لغرض ضمان الاستقرارية فان مميزات القدرة / التردد لمنظومة ما يمكن تمثيلها بصورة تقريبية كالاتـي

$$\Delta P + K\Delta f = 0 \qquad [7.12]$$

حيث ان Δf هي التغير الضئيل في التردد الذي يصحبه تغير ضئيل ΔP في القدرة في الحمل أو التوليد اما الثابت K فيعتمد على خواص كل من المتحكم والحمل ذاته . لمنظومة الشبكة الـكبرى البريطانية تكون قيمة K حوالي 5000 MW/Hz خلال الاشتغال في فترة النهار .

اذا ربطت منظومتان A ، B . فان اي تغير مفاجيء لـ ΔP على A سيؤثر على التردد المشترك . وبما ان الاضطراب سيقتسم بين هاتين المنظومتين وفقاً لخواصيهما بالنسبة الى القدرة / التردد . فسيكون هناك تغير في القدرة المنتقلة بين المنظومتين وهـذا التغير سوف يعادل التغير الحاصل في قدرة المنظومة B . وعليه .

$$\left.\begin{array}{l}\Delta P_A+K_A\Delta f=0\\ \Delta P_B+K_B\Delta f=0\end{array}\right\} \qquad [7.13]$$

وكذلك

$$\Delta P_A+\Delta P_B=\Delta P. \qquad [7.14]$$

من [7.13] و [7.14] ينتج

$$\Delta P_A=\frac{K_A}{K_A+K_B}\Delta P \qquad [7.15]$$

$$-\Delta P_B=\frac{-K_B}{K_A+K_B}\Delta P=\Delta P_i \qquad [7.16]$$

حيث ان ΔP_i تمثل التغير في انتقال القدرة خلال الرابط المشترك ، والاشارة الموجبة تشير الى انسياب القدرة من A الى B .

اذا تم فصل هاتين المنظومتين ، فأن الاضطراب ΔP في منظومة واحدة ، والذي سوف يؤثـر على تلك المنظومـة فقط ، سيؤدي الى تغير فـي تردد تلك المنظومة ، حيث كان ايضا يمثل التغير في الفرق بين تردد االمنظومتين . عليه فللأضطراب ΔP الحاصل فـي المنظومة A تكون .

$$\Delta f_A=\Delta(f_A-f_B)=-\frac{\Delta P}{K_A}. \qquad [7.17]$$

ومن [7.16] و[7.17] ينتج

$$\Delta P_i=-\frac{K_B}{K_A+K_B}\cdot\Delta P=\frac{K_AK_B}{K_A+K_B}\cdot\Delta(f_A-f_B). \qquad [7\cdot18]$$

المعادلة [7.18] تعطي مقدار القدرة المنتقلة في رابط تيار متناوب مشترك بيـــن منظومتين كانتا تشتغلان بصورة مستقلة عن بعضهما بترددين f_A و f_B . وبعد أن تمت عملية الربط فيما بينهما وجب ان يشتغلا بالتردد نفسه طالما تمت المحافظة عـــلى التزامن فيما بينهما ، وعليه فان $\Delta(f_A-f_B)=f_A-f_B$

وفي بلد مثل بريطانيا وبلاد اخرى متقدمة ايضا لاتوجد لحد الان طريقة تلقائيـــة للسيطرة على التردد في الوقت الحاضر مع انه تم انجاز تطوير كبير في هذا المجال ومثل هذه السيطرة من المحتمل ان تكون جزءاً من التقدم باتجاه تنفيذ السيطرة الطوعية على التوليد والنقل . حيث ان اي زيادة حاليا في الحمل المطلوب تؤدي الى انخفاض جزئي فـي التردد . حيث ان القدرة الاضافية ستجهز من قبل الطاقة الحركية لطواقم التوليد نفسها . والتغير القليل في السرعة هذا يسبب زيادة القدرة الداخلة للمحرك التوربيني من خلال عمل المتحكم . لذا ستأتي القدرة الاضافية مبدئيا من الطاقة الحرارية المخزونة للمراجل الى ان تأخذ نسبة الاحتراق الجديدة فيه مفعولها . هذه العملية قد تكون ذاتية (تلقائية) أو يدوية . حيث ان الاخيرة في الوقت الحاضر هي الشائعة الاستعمال . عندماتتحقق حالة الاستقرار بعد الزيادة في الحمل هذه . سيحدث هبوط في التردد يتناسب مع هذه الزيادة (بموجب المعادلة [7.12]) . اذا تسبب تأثير عدد من التغيرات في الحمل خلال فترة زمنية ما بانخفاض في التردد والذي يتطلب تصحيحه . فان واحدة مـــن المحطات او أكثر سوف تؤمر بزيادة خرجها . وهذا سيؤدي الى زيادة التردد بحيث تقوم مولدات أخرى برمي جزء من الحمل بوساطة فعل المتحكم .

ان الربط المشترك بين منظومتين بوساطة وصيل تيار مستمر وهو الحالة المستخدمة في الوصيل العابر للقناة الانكليزية بين بريطانيا وفرنسا يجنبنا استخدام معدات السيطرة الذاتية للتردد والذي قد يكون ضرورياً للرابط المشترك ليحمل جزء صغيراً جداً فقط من مقدار التوليد في كلتا المنظومتين . ويجنب الوصيل غير المتزامن تحديدات الاستقرارية أيضاً . لذلك فانه لاوجوب لتعويض القدرة المتفاعلة المتقدمة لخط أولقابلو معين يراد حملها بوساطة الموصلات . لذا فانه يمكن اجهاد عازل القابلو بكفاءة أكبر . الصعوبات الحاصلة فـي تجهيز الحمل الاضافـي المطلوب فـي مدن كبيـرة فـي بريطانيـا . اي الصعوبات المتزايدة للحصول على طرق حرة لمسار خطوط الشبكة الفائقة (E.H.V) القادمة الى المدن . وكذلك تيار الشحن لقابلوات الفولتية المتناوبة العالية والتي تقترب من تقنينها لاطوال مقدارها بضع كيلومترات . كل هذه قد تسبب في النهاية تبني إستخدام وصائل التيار المستمر ذات الفولتية العالية بين مراكز الاحمال وخطوط النقل المنتهية في ضواحي المدن .

المراجع

Davies, M., Morgan, F. & Bird, J. I. 1959, 'Power frequency characteristics of the British Grid System', *Proc. I.E.E.*, **106**, Part A, No. 26, pp. 154–167.

Fenwick, D. R. & Wright, W. F., 'Review of trends in excitation systems and future developments', 1976, *Proc. I.E.E.*, **123**, pp. 413–420.

Horsley, W. D. 1963. 'Turbo-type generators—a review of progress', *Proc. I.E.E.*, **110**, No. 4, pp. 695–702.

Kirtley, J. L. & Furuyama, M. 1975, 'A design concept for large superconducting alternators', I.E.E.E., Trans, PAS 94, pp 1264–1269.

Lorch, H. O., 'Feasibility of turbogenerator with superconducting rotor and conventional stator', 1973, *Proc. I.E.E.*, **120**, pp 221–227 & 1256–1259.

Mason, T. H., Aylett, P. D. & Birch, F. H. 1959, 'Turbo-generator performance under exceptional operating conditions', *Proc. I.E.E.*, **106**, Part A, No. 29, pp. 357–380.

Miller, T. J. E. & Hughes, A. 1977, 'Comparative design and performance analysis of air-cored and iron-cored synchronous machines', *Proc. I.E.E.*, **124**, pp 127–132.

Spooner, E., 'Fully slotless turbogenerators', 1973, *Proc. I.E.E.*, **120**, pp 1507–1518 & **122**, pp 75–79.

Vickers, V. J., 'Recent trends in turboalternators', 1974, *Proc. I.E.E.*, **121** (IIR), pp 1273–1306.

مسائل

1 - منوب ذو قطر بارز مفاعلتاه التزامنيتان للمحورين المباشر والعمودي هما 0.7 و 0.4 بنسبةالوحدة على التوالي . اذا اشتغلت الماكنه عند الفولتية الطبيعية وبالحمل الكلي بعامل قدرة متأخر 0.8 . فالى اي قيمة سوف ترتفع فولتية الطرف اذا تم فصل الحمل ؟ اهمل اي تأثير لمقاومة الساكن والتشبع المغناطيسي .

(جامعة لندن) (الجواب : 1.517 بنسبة الوحدة)

2 - ربطت قضبان توزيع محطة توليد الى منوبات ذات سعة كبيرة . وربط منوب اخر انئذ الى هذه القضبان وكانت المفاعلة التزامنية لملفات الساكن لهذا المولد للطور الواحد 4 اوم ومقاومته مهملة . وكان هذا المنوب يجهز تيارا قدرة 100 امبير بعامل قدرة متأخر 0.8 . احسب الـ ق . د . ك للدائرة المفتوحة لهذا المنوب وزاوية ازاحته δ من فولتية الطرف .

اذا ازداد تجهيز البخار للمنوب وزادت δ بمقدار 10° . احسب تيار الحمل الجديد الذي يجهزه المنوب وكذلك عامل قدرته .

اذا تغيرت بعد ذلك شده الاثارة للمنوب الى ان يرجع عامل القدرة مرة اخرى للقيمة 0.8 متأخرا . احسب التيار المجهز في هذه الحالة من قبل المنوب . افرض ان فولتية قضيب التوزيع تبقى على القيمة 11ك . ف .

(جامعة لندن) (الجواب 6600 ف ، $2^\circ\ 15'$ ، 370 امبير . عامل القدرة 0.98 ، 455 امبير) .

3 - مولد تزامني ثلاثي الطور نجمي الربط ، تردده 50 هرتز . وفولتيته 6.6 ك.ف دواره اسطواني الشكل له مميزات الدائرة المفتوحة عند السرعة المقننة معرفة بالبيانات التالية .

فولتية الخط (ك . ف)	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
تيار الاثارة (امبير)	38	51	64	80	105	172

اذا كانت مقاومة المنتج مهملة . وكان تيار الاثارة اللازم لسريان تيار حمل كلي

في المنتج هو 180 امبير بفولتية طرف قدرها 6·6 ك. ف وعامل قدره صفري متأخر . اما تيار الاثارة اللازم لسريان تيار حمل كلي في ملفات الساكن في حالة الدائرة القصيرة فهو 72 امبير.

اوجد . في كلتا الحالتين ولتيار حمل كلي في الساكن :

(أ) فولتية الطور للمفاعلة التسربية للساكن.

(ب) الـ ق د. مغ لرد فعل المنتج بدلالة تيار الاثارة

(ج) تيار الاثارة اللازم لاشتغال المولد بفولتية طرف مقننة وعامل قدرة حمل مقدارة 0·8 متأخرا .

(جامعة لندن) (الجواب 415 ف 63 امبير . 154 امبير)

4 -محرك تزامني ثلاثي الطور . نجمي الربط تردده 50 هرتز وعدد اقطابه 12 اعطى مميزات الدائرة المفتوحة عند سرعة 500 دورة الدقيقة كالاتي :

تيار المجال (امبير)	0	20	40	60	80
فولتية الخط (فولت)	0	1250	2150	2650	3050

مقاومة ملفات الساكن والمفاعلة التزامنية للمحرك لكل طور هما 0·5 و 4·0 اوم على التوالي . جد تيار الدخل وتيار المجال عندما يشتغل المحرك بعامل قدرة واحد (1·0) من مصدر كهربائي ثلاثي الطور فولتيته 2200 فولت وتردده 50 هرتز. الحمل المسلط على المحرك هو من القيمة بحيث يقوم المحرك بتحويل 450 كيلوواط الى قدرة ميكانيكية .

(H.N.C.) (الجواب 124 امبير . 44 امبير)

5 - منوب نجمي الربط ثلاثي الطور بقدرة 1500-kVA يمتلك خواص الدائرة المفتوحة التالية .

الـ ق. د. ك المتولدة (فولت	2080	2800	3300	3700	4000
تيار الاثارة (امبير)	50	75	100	125	150

تجهز هذه الماكنة ثلثي تيار الحمل الكلي عند الفولتية المقننة وعامل قدرة 0·8 متاخرا . مقاومة الساكن هي 0·04 اوم طور ورد فعل المنتج في هذا المقدار من

الحمل يمكن اعتباره معادلا لتيار مجال مقداره 50 امبير.فاذا كانت الممانعة التزامنية في هذه الظروف هي 2·5 اوم . فاحسب الممانعة التسربية للساكن/ طور (علق على دقة النتائج المستحصلة).
(جامعة لندن) (الجواب 0·31 اوم)

6-منوب ثلاثي الطور نجمي الربط له اقصى قدرة مقننة مستمرة 60 MW ،75 MVA مفاعلته التزامنية لكل طور هي 1·5 بنسبة الوحدة ومقاومة الساكن مهملة . ارسم مخطط الاداء له لفولتية طرف ثابتة على اساس نسبة الوحدة . خذ كل واحد بنسبة الوحدة معادلا لـ 75 MVA . وادخل على هذا المخطط حدود الاستقرارية بجعل نطاق الامان 10% للميكواط المقنن . ما هي الاثارة الدنيا (معبرا عنها بالنسبة المئوية من فولتية الطرف) التي تستطيع اعطاء خرج يعادل 60 MW ضمن خط حدود الأستقرارية هذا .

(L.C.T.) (الجواب 132%)

7 - منوبان ثلاثيا الطور نجميا الربط يشتغلان على التوازي . قدرتاهما المقننتان 10 000 kVA و 5000 kVA بفولتية 6·6 ك . ف . كل منوب يجهز تياراً حمله الكلي الى حمل بعامل قدرة متأخر 0·8 . وكل منوب يولد فولتية طور مقدارها 7000 √3 تتقدم على فولتية الطرف للطور بزاوية 10° . مقاومة ملفات الساكن مهملة .

أحسب (أ) فولتية الطرف .م(ب) المفاعلة التزامنية لكل مولد (ج) الممانعة المكافئة للحمل طور .

اذا تم تنظيم كل من الأثارة و جهاز السيطرة على البخار بحيث ان المولد الذي بقدره 5000-kVA ازدادت فولتيته المتولدة بنسبة 10% ولكن بقيت الفولتيات المتولدة في المولدين بازاحة 10° من فولتية الطرف. أحسب فولتية الطرف تحت هذه الظروف .

(جامعة لندن) (الجواب : 6·0 ك. ف. 0·98 اوم1·96 اوم2·12+j1·58 اوم. 6·25 ك.ف).

8- مولد ثلاثي الطور مفاعلته التزامنية للمحور المباشر 1·0 بنسبة الوحدة ومفاعلته التزامنية للمحور التعامدي 0·65 بنسبة الوحدة لكل طور .

ارسم المخطط الطوري للماكنة عندما تشتغل بحمل كلي وعامل قدرة متأخر 0·8 .

وأحسب عند ذلك (أ) زاوية الحمل . (ب) ال ق . د . ك بنسبة الوحدة في حالة اللاحمل أهمل مقاومة المنتج وتأثير التشبع .
(جامعة لندن) الجواب د 20 . 1.77 بنسبة الوحدة)

9 . منوبان متشابهان نجميا الربط يعملان على التوازي . فولتيتا الطور المتولدة هما $E_1 = 6700\,V$ و $E_2 = 6500\,V$ حيث أن E_2 تتقدم E_1 بزاوية $10°$. احسب عامل القدرة للحمل اذا كان تيار الحمل الكلي هو 500 A يتأخر عن E_1 بزاوية $37°$. المفاعلة التزامنية لكل منوب هي 10 أوم طور والمقاومة مهملة .
(جامعة لندن) (الجواب 0.93)

10. منوب ثلاثي الطور نجمي الربط قدرته 5000-kVA وفولتيته 6.6 ك . ف مفاعلة ملفات الساكن التزامنية طور هي 3.6 أوم ومقاومتها مهملة .
احسب فولتية الدائرة المفتوحة عند الاثارة اللازمة لأخراج تيار حمل كلي بعامل قدرة متأخر 0.8 اذا كان المنوب مربوطاً الى قضبان توزيع فولتيتها 6.6 ك . ف . اذا بقيت القدرة المجهزة للمولد ثابتة . أحسب (أ) التيار وعامل القدرة التي سيعمل عندهما المنوب عندما تزداد الأثارة الى قيمة بحيث تزداد فولتية الدائرة المفتوحة بنسبة 10٪ . (ب) التيار وعامل القدرة المستحصلين عند تقليل الأثارة الى أدنى قيمة تشغيل ممكنة .
(جامعة لندن) (الجواب : 8.5 ك. ف. 532 أمبير 0.66 . 1120 أمبير . 0.31) .

11 . مولدان ثلاثيا الطور يعملان على التوازي ويجهزان حملا اجماليا قدره 6 MW بعامل قدرة متأخر 0.8 . قل تردد أحد المولدين ذاتيا من 51 الى 49.75 هرتز عندما حمل بـ 10 MW . وقل تردد الاخر من 51 الى 49.5 هرتز عندما حمل بـ 2 MW . اوجد القدرة المجهزة من كلا المولدين عندما يكونان على التوازي . وكذلك عامل القدرة للمولد الأول اذا كان عامل القدرة للثاني 0.71 متأخرا .
(H.N.C.) (الجواب : 5143 kW ، 857 kW ،0.815)

12. منوبان متماثلان ثلاثيا الطور نجميا الربط مربوطان على التوازي ليجهزا حملا نجمي الربط له مقاومة 4 أوم ومفاعلة حثية 3 أوم لكل طور . عند الاثارة تكون فولتية الطور لكل مولد هي 5 ك . ف وهاتان الفولتيتان تكونان في الطور نفسه . ملفات الساكن لكل مولد لها مفاعلة تزامنية مقدارها 3 أوم طور ومقاومة مهملة . احسب فولتيات الطرف للمنوبين .

منوب مماثل ربط الى قضبان توزيع فولتيتها 6600 فولت. ونظم كل من البخار المجهز والأثارة الى أن جهز هذا المنوب 500 أمبير بعامل قدرة متأخر 0·8 . فاذا زادت فولتية الأثارة بمقدار 10% . فأحسب عامل القدرة الذي سيشتغل عنده المولد والتيار الذي يجهزه .

جامعة لندن) (الجواب 7210 ف . 0·65 . 610 أمبير)

13 . مولد تزامني ثلاثي الطور . نجمي الربط يشتغل على قضبان توزيع لانهائية فولتيتها 11ك . ف . . مميزات الدائرة المفتوحة له هي :

تيار الاثارة (أمبير)	50	110	140	180
فولتية الخط للدائرة المفتوحة ك . ف	7	12·5	13·75	14·8

احسب القدرة المتولدة والقدرة الخارجة الناتجة عن تيار اثارة مقداره 160 أمبير وزاوية قدرة 50° . مقاومة الساكن ومفاعلته التزامنية / طور هما 0·5 أوم و9 أوم على التوالي

(13·35 MW , 14·1 MW : الجواب) (L.C.T.)

14 . محرك تزامني ثلاثي الطور . 50 هرتز . 300 دورة / دقيقة . قدرته 500-kVA وفولتيته 3·3ك . ف . اثارته منظمة على 1·5 بنسبة الوحدة . فاذا كانت المفاعلة التزامنية للمحور المباشر للمحرك هي 0·8 بنسبة الوحدة وكذلك المفاعلة التزامنية للمحور التعامدي هي 0·65 . فاوجد زاوية القدرة التي يخرج عندها المحرك عن طوره والعزم المناظر لهذه الزاوية . افرض ان الماكنة غير متشبعة .

(L.C.T.) (الجواب : 81·7 ؛ 30 600 نيوتن . متر)

15 . منوب قدرته [illegible] 60 MVA . فولتيته 11ك . ف وعامل قدرته عند القدرة المقننة 0·8 متأخراً . مفاعلته التزامنية 2·0 بنسبة الوحدة ومقاومته مهملة . اختر مقياس قدرة ثلاثي الطور بالـ MVA مناسبا . ارسم مخطط الاداء لهذه الماكنة مبينا عليه خط حدود الاستقرارية لحالة دون الاثارة خذ سماحاً لنطاق امان قدرة 10% .

أشتق معادلة رياضية تبين العلاقة بين مقياس الفولتية ومقياس قدرة الأطوار الثلاثة MVA . وأحسب فيها فولتية الطور بنسبة الوحدة اذا كان الربط الذي رسم عليه المخطط نجميا .

الجواب (كل 1 سم 20 MVA . فولتية الطور = 1·88 سم)

16 . منظومة قدرة A لها مميزات تردد – قدرة تشير الى أن انخفاضا في التردد مقداره

0·1 هرتز يسبب حملاً اضافياً قدره 250 MW. والتغير المناظر لهذا الانخفاض في التردد لحمل أخر مربوط على شبكة B هو 400 MW. وفي فترة معينة من الزمن . تشتغل الماكنة A بتردد 49·85 هرتز والشبكة B بتردد 50·00 هرتز . ما مقدار القدرة المنتقلة اذا ربطت المجموعتان على التوازي عن طريق رابط تيار متناوب قصير .

(L.C.T.) (الجواب : 231 MW من B الى A)

17. مولد قدرته 100-MVA . ذو ثلاثة أطوار . 50 هرتز. لـه مفاعـلات مقاسة بنظام نسبة الوحدة مع ثوابت زمن كالاتي :

$X_d = 1{\cdot}2 \quad X'_d = 0{\cdot}3 \quad X''_d = 0{\cdot}2 \quad T_a = 0{\cdot}25$ ثانية

$T'_d = 1{\cdot}0$ ثانية $\quad T''_d = 0{\cdot}04$ ثانية

اذا حصل عطل دائرة قصيرة على الاطوار الثلاثة بالتماثل (عطل متماثل) عندما كان المولد يولد فولتية وترددا مقنين . فاوجد التيار غير المتماثل في الطور a بعد مرور ثلاث دورات . افرض ان العطل حدث عندما كانت $e_a = 0$.

(L.C.T.) (الجواب : 6·6 بنسبة الوحدة)

الفصل الثامن

حسابات الأعطال في منظومة القدرة

POWER SYSTEM FAULT CALCULATIONS

8.1 مقدمــة

يقال أن عطلا حدث في منظومة القدرة عندما تجري تيارات عالية غير أعتياديــة بسبب الأخفاق الجزئي او الكلي للعازل عند نقطة أو أكثر . الأخفاق الكلي للعازل يدعى بالدورة القصيرة . حسابات العطل تشمل ايجاد توزيع الفولتية والتيار في كل مكان في المنظومة خلال فترة العطل . يمكن أن يجري تيار عال غير أعتيادي نتيجة لفولتية عالية غير أعتيادية على المنظومة بسبب صاعقة أو بسبب تمورات الأقلدة switching surges (انظر الجزء 2) والتي تخرق او تسبب شررا عرضيا عبر سطوح عوازل كانت سليمة قبل ذلك . والتلف الناتج (أو تأين العازل المحيط) سيسبب تبعا لذلك شرارة قدرة .

العبارة تيار عال غير أعتيادي يجب أن يعبر عنها بنسبة التيار الذي يكون موجودا فــي الدائرة بصورة طبيعية . من المعتاد أن يكون هناك تسرب تيار قليل الى الأرضي أو لا يكون بحيث أن تيار عطل – ارضي قد يعني أي تيار أكثر من صفر . كذلك من الممكن لتيار العطل عند اوقات الحمل الخفيف – صباح الأحد في الصيف مثلا – ان يكون أقل مــن تيار الحمل – الأقصى في الشتاء . الحمل الخفيف يدل على مولدات عدة متباعدة عــن بعضها في المنظومة معطية ممانعة مصدر عالية والتي بدورها ستحدمن تيار العطل .

هذا في بريطانيا ويقابله في العراق صباح الجمعة في الربيع (المترجمان)

سنتعامل اولاً مع أعطال ثلاثية الطور متماثلة . ومن ثم سنتعامل مع الأعطال غيـــر المتماثلة مثل أعطال الأرضي أو أعطال خط الى خط وسنستعمل لهذه الأخيرة طريقة المركبات المتماثلة .

عندما نذكر ال MVA بالترابط مع العطل وقواطع الدورة فيجب أن يفهم بوضوح أن الفولتية التي يضرب بها التيار لأعطاء الفولت أمبير هي الفولتية المقننة لذلك الجزء من المنظومةوليست هي الفولتية الفعلية عند العطل أوعلى قاطع الدورة . وبما أن الفولتية المقننة تكون دائما معروفة فان ال MVA (في هذا المجال) تكون طريقةغير مباشرة لأعطاء تيار العطل . عندما يمر تيار العطل من خلال محول ذي ملفين فان مقداره سيتغير ولكن ال MVA للعطل لن تتغير .

عند حدوث عطل عند نقطة في منظومة القدرة . فان MVA العطل الموافقة يشار اليها بمستوى العطل عند تلك النقطة . ومالم يذكر غير ذلك . فأنها ستشير الى دورة قصيرة متماثلة ثلاثية الطور .

منظومة نسبة الوحدة(p.u.) للوحدات المناقشة في ملحق 1 ستستعمل خلال كل هذا الفصل .

8.2 دائرة قصيرة ثلاثية الطور متماثلة Symmetrical 3-phase Short-circuit

8.2.1 الحسابات الأساسية BASIC CALCULATIONS

هذا العطل يعرف بأنه دائرة قصيرة آنية عبر كل الأطوار الثلاثة . وهذا نـــادراً مايحدث . فمثلا عند ربط الأطوار الثلاثة سوية الى الارضي في أي خط لكي يكـون أمينا عند اجراء الصيانة عليه وبالصدفة ثم تشغيله . أوبسبب البطء في أزالة العطل وكان هناك عطل أرضي فان هذا العطل سينتشر عبر الطورين الآخرين. أوعندما تقطع ماكنة حفر ميكانيكية كل القابلو بسرعة . انه عطل من النوع المهم لكونه يؤدي الى حسابات سهلة والجواب المتحفظ هو أسوأ مايمكن أن نحصل عليه بالنسبة الى مستوى العطل (هنـــاك استثناء من هذا الفصل سنتعامل معه في الفقرة 8.4.9) .

في الدائرة المتماثلة كليا تكون الحسابات سهلة لأنه يمكن أن نعاملها بوصفها ربطاً نجمياً لكل طور أي أن المعدات مربوطة بشكل نجمي (أويتم أبدالها بربط نجمي اذا كان كان الربط مثلثيا كما مبين في الملحق (2) بحيث أن الحسابات يمكن أن تجرى على طور واحد من الدائرة . الحسابات في الدائرة الاحادية الطور هذه باستعمال ال ق.د.ك للطور (خط الى محايد) وممانعات الطور ستعطينا تيار طور يمكن من خلاله تعريف التيار في الطورين الآخرين . بما أنهما مساويان له في المقدار ومزاحان عنه بـ 120° . 240° . عندما يكون العطل غير متماثل فهذه النظرية سوف لاتنطبق وسنحتاج الى النظرية الأكثر شمولية التي تستعمل المركبات المتماثلة وكما مبين في الفقرتين 8.3 ، 8.4 .

ان تخمين الـ MVA المقننة التي نحتاجها لقاطع دورة غالبا ماتجرى على أفتراض أنها يجب ان تزيل عطلاً ثلاثي الطور . والذي هو الحالة الأسوأ بصورة عامة . لأنه من المعقول الأفتراض أن قاطع الدورة يمكن أن يزيل اي عطل آخر . لذلك فان قدرة القطع المقننة لقاطع الدورة بالـ MVA يجب ان تكون مساوية أو أكبر من الـ MVA لمستوى عطل ثلاثي الطور .

بما أن قواطع الدورة تصنع بالاحجام القياسية المفضلة مثلا 250 و 500 و MVA750. فالدقة العالية ليست ضرورية في حسابات مستوى عطل ثلاثي – الطور عند نقطة ما في منظومة القدرة . لذلك من المناسب عمل الأفتراضات التالية :

(أ) ـ قبل حدوث العطل مباشرة . تكون المنظومة في حالة اللاحمل عند التردد المقنن وتهمل كل التيارات ما عدا تيار العطل . من المعتاد الافتراض ان كل المولدات تشتغل عند فولتياتها المقننه مثلا 11 و 33 كيلوفولت . الا اذا نص على غير ذلك. ومرتبطة فيما بينها بمحولات تعمل عند النسبة الملائمة . مثلا 11/33 كيلوفولت .

(ب) تكون ق.د.ك لكل المولدات منطبقة الطور . وهذا يعني ان المنظومة ليست في حالة تأرجح اي ان التيارات المزامنة قد سحبت كل المكائن الى التزامن (او الطور الواحد) قبل حدوث العطل .

التأثير المشترك لـ (أ) و (ب) يعني ان كل المولدات يمكن ان تبدل بمولد مكافيء واحد لكون كل القوي الدافعة الكهربائية متساوية ومنطبقة الطور . كلمة متساوية يجب ان تفسر على انها متساوية عند التعبير عنها بدلالة نسبة الوحدة (p.u) او بالفولت على

مستوى الفولتية نفسه . هذه الطريقة تدعى احيانا ربط المصادر على التوازي الى قضيب توزيع ذي ق. د.ك. مشتركه ((تبين منقطة في المخططات لأن ليس لها وجود فعلي) وممانعات المنوبات تعامل بعد ذلك بوصفها جزء من شبكة ممانعة منظومة القدرة .

(ج) تهمل مقاومة المنظومة وتؤخذ المفاعلة الحثية للمنظومة فقط . هذا يعطينا ادنى قيمة لممانعة المنظومة وأقصى تيار عطل واجابة متحفظة . الفائدة العظمى التي نحصل عليها من هذه الفرضية ان كل المفاعلات والتيارات والفولتيات يمكن ان تعامل حسابيا . يجب على الطالب ان يدقق في ان الفرق بين Z و X عندما $X = 5R$ هو حوالي 2 % فقط وهذا مقبول اذا علمنا أن ممانعات المنظومة من المحتمل أن لاتكون معلومة بدقة تزيد على حوالي 5 % من قيمها . النسبة X/R للمنوبات تكون بحدود 20/1 وللمحولات حوالي 10/1 . ولخطوط الفولتية العالية . حوالي 8/1 الى 3/1 . اهمال المقاومة يكون غير مقبول بالنسبة للخطوط العلوية المعلقة الخفيفة ذات 11 كيلوفولت فأدنى أو للقابلوات حيث أن X و R غالباً ما تكون متساوية تقريباً . ولكن في العديد من مثل هذه الحالات تكون المنظومة دائرة اشعاعية (متوالية) و $Z = R + jX$ يمكن أن تستعمل بدون صعوبة بالغة . والطريقة هي تصغير المنظومة الى مفاعله واحدة ثم يحسب التيار عند نقطة العطل وتعاد متابعة خطوات الحسابات لايجاد توزيع التيارات والفولتيات في كل المنظومة .

كل الفرضيات أعلاه تكون ملائمة للحصول على تقدير لمستوى عطل ثلاثي الطور عند نقطة في منظومة القدرة . وللحصول على نتائج اكثر دقة يجب أن نأخذ في الحساب تيارات الحمل باستعمال نظريات الشبكات مثلاً تفنن (Helmholtz) أو التراكب . ومن الممكن اضافة المقاومة الى ممانعة المنظومة . وباستعمال الحاسبات الرقمية تصبح الطرق الدقيقة في الحساب من المسائل الأقتصادية .

اذا أفترضنا حدوث دائرة قصيرة ثلاثية الطور متماثلة على منظومة ذات فولتية مقننة V_r وجعلنا ال ق.د.ك / طور (ق.د.ك لقضيب التوزيع المشترك) تساوي E فولت خلف مفاعله مقدارها X أوم / طور ممثلة للمنظومة ككل مصغرة الى مفاعلة واحدة . فعندئذٍ يكون تيار العطل الطوري

$$I_f = E/X \text{ amperes.} \qquad [8.1]$$

E و X يجب أن تنسب لمستوى الفولتية نفسه في المنظومات المشتملة على محولات . غالباً ماتواخذ على أنها فولتية الطور المقننة V_r (انظر الأفتراض) على أنها ستتعداها بصورة عامة بكمية ليست كبيرة اذا كان تيار العطل محسوباً للدورة الاولى أو لدورتين بعد حدوث الدائرة القصيرة (انظر الفقرة 7.5) كما نحتاجها بصورة عامة . مستوى عطل ثلاثي الطور VA لذلك يكون

$$(VA)_f = 3\, V_r \,.\, E/X \text{ volt-amperes.} \qquad [8.2]$$

عند التغيير الى الترميز بنسبة الوحدة (انظر الملحق 1) وباستعمال الرمز السفلي (b) للقيمة الاساس لاية كمية عندئذ

$$I_{f\cdot pu} = I_f/I_b, \quad E_{pu} = E/V_b \quad \text{and} \quad X_{pu} = X/X_b.$$

يبين الملحق 1 ان المعادلة [8.1] يمكن ان تكتب كما يلي

$$I_{f\cdot pu} = E_{pu}/X_{pu}. \qquad [8.3]$$

الاساس فولت امبير / طور = V_bI_b وبذلك يكن فولت امبير العطل بنسبة الوحدة

$$(VA)_{f.pu} = \frac{V_r \,.\, E/X}{V_bI_b} = \frac{E}{V_b} \cdot \frac{V_r}{I_bX}.$$

من الضروري الملاحظة أن رقم 3 في المعادلة [8.2] قد ألغي تماماً في فولت أمبير نسبة الوحدة . اذا كانت الفولتية الأساس مساوية للفولتية المقننة أي أن $V_b = V_r$ فأن

$$(VA)_{f\cdot pu} = E_{pu}/X_{pu}. \qquad [8.4]$$

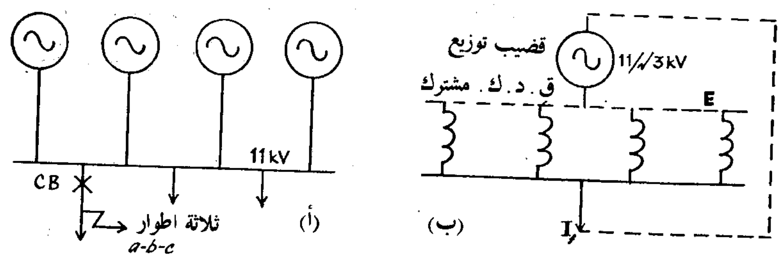
E غالبا ماتؤخذ مساوية لـ V_r كما نوقشت أعلاه ولذلك تكون مساوية لـ V_b أي أن $E = 1{\cdot}0$ بنسبة الوحدة .
المعادلات [8.3] و [8.4] يمكن أن تختصر الى

and $$I_{f\cdot pu} = 1/X_{pu} \quad [8.5]$$

$$(VA)_{f\cdot pu} = 1/X_{pu}. \quad [8.6]$$

مثـــال محلـــول *8.1*

الشكل 8.1 (أ) يبين أربعة منوبات مماثلة لبعضها مربوطة على التوازي وكل منهـــا مقنن عند 11 كيلوفولت و 25 MVA وكل منها له مفاعلة (دون العابرة) مقدارها 16 % محسوبة على مقننها (الحراري المستمر). أوجد مستوى العطل الثلاثي الطور عند أحـــد المغديات الخارجة .



(أ) المنظومة الفعلية (خط أحادي) (ب) الدائرة المكافئة

شكل 8.1 عطل ثلاثي الطور

الحـــل :

الأساس 11 كيلوفولت و 25 MVA. العطل من منوب واحد يكون

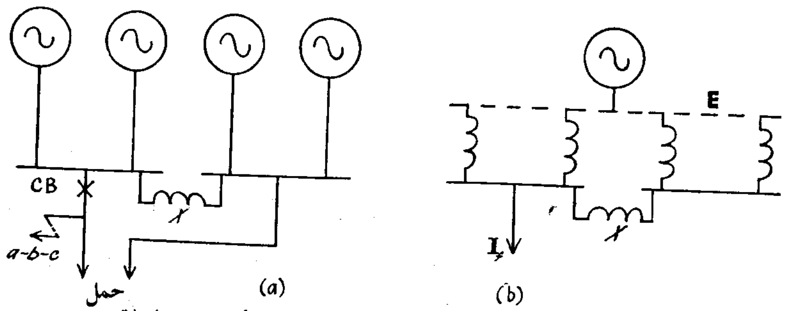
$$(VA)_{f\cdot pu} = 1/X_{pu} = 1/0{\cdot}16 = 6{\cdot}25 \text{ p.u.}$$
$$(VA)_f = 6{\cdot}25 \times 25 = 156 \text{ MVA.}$$

MVA. العطل الكلي $4 \times 25 \times 6{\cdot}25 = 625$ ميكا فولت أمبير . طريقة بديلة للحل . شكل 8.1 (ب) يبين المنوبات الاربعة مربوطة على التوازي الى القضيب الموصـــل ذي ال ق . د . ك . المشتركة . مفاعلات المنوبات تعامل بوصفها جزء من مفاعلة المنظومة والمفاعلة الكلية ستكون $0{\cdot}16/4 = 0{\cdot}04$ بنسبة الوحدة و MVA العطل يكون

$$(VA)_{f.pu} = 1/0{\cdot}04 = 25 \text{ p.u.}$$
$$(VA)_f = 25 \times 25 = 625 \text{ MVA.}$$

8.2.2 الملفات المفاعلة المحددة للتيار CURRENT-LIMITING REACTORS

في المثال 8.1 كان مستوى العطل 625 MVA. بينما تكون أقرب القيم المقننـــة لقواطع الدورة القياسية هي 500 و 750 ميكا فولت أمبير . اذا كان من الضروري أستعمال قواطع دورة 500 MVA لأسباب أقتصادية فعندئذ يجب تقليل تيار العطل عن طريق زيادة مفاعلة المنظومة . اذا كانت المنظومة في مرحلة التصميم فعلى الطالب أن يدقق في أنه اذا كان للمنوبات الموصوفة مفاعلة 20 % (دون العابرة . انظر الفقرة 7.5) فسيكون ذلك هو الحل المطلوب . أما اذا كانت المنظومة موجودة فعلاً فعندئذ من الضروري اضافة مفاعلات منفصلة أما على التوالي مع كل منوب أو على التوالي مع كل مغذ او بتجزيء قضيب التوزيع وربط أجزائه عن طريق ملف مفاعل قضيب التوزيع كما هو الحال بصورة عامة وكما مبين في شكل 8.2 .



شكل 8.2 قضيب توزيع مجزأ

مثـــال محلـــول 8.2

بأستعمال البيانات المعطاة في المثال 8.1 والدائرة المربوطة المبينة في شكل 8.2 أحسب مفاعلة الملف المحدد للتيار X لكي يحد مستوى العطل على المغذي الى 500 MVA

الحــل

الأساس 11 kV و 25 MVA .

اثنان من المنوبات سيغذيان 625/2 = 312·5 MVA مباشرة الى محـــل العطل لذلك فتغذية الجزء الآخر يجب أن تحدد الى 500 − 312·5 = 187·5 MVA وتســاوي 187·5/25 بنسبة الوحدة وتســاوي $1/X_t$ حيــث أن X_t هــي مفاعلة الجزء الأيمن الـكلية مقاسة بنسبة الوحدة لذلك فأن X_t = 25/187·5 = 0·133 بنسبة الوحدة = 13·3% . بما أن هناك منوبين مربوطين على التوازي ولهما مفاعلة مشتركة 16/2 = 8% فأن ملف مفاعل قضيب التوزيع يجب أن يهيىء المفاعلة المتبقية أي 13·3 − 8 = 5·3% .

القيمة الأومية للمفاعلة يمكن حسابها كمايلي :

الفولتية الاساس = 1 بنسبة الوحدة = $11/\sqrt{3}$ = 6·36 كيلو فولت

التيار الأساس = 1 بنسبة الوحدة = $25/(\sqrt{3}\times 11)$ = 1·31 كيلو أمبير

المفاعلة الأساس = 1 بنسبة الوحدة = 6·36/1·31 = 4·86 اوم

ومفاعلة 0·053 بنسبة الوحدة = 4·86 × 0·053 = 0·258 أوم

ان مواصفات الملفات المفاعلة المحددة للتيار معطاة بالمواصفات البريطانية القياسية B.S.S. 171 وســنبين الان بعض النقـاط البارزة . التيـار المقنن هـو التيـار الذي يستطيع أن يتحمله الملف المفاعل بصورة مستمرة بدون تجاوز درجة الحرارة الموصوفة أعتماداً على نوع العازل المستعمل . في المثال 8.2 من الممكن للملف المفاعل أن يكون مقنناً لـكي يحمل تياراً موافقاً الى 25 MVA عند 11 كيلو فولت أي 1·31 كيلو أمبير بحيث أنه اذا أصاب العطل أحد المنوبات فأنه من الممكن أخذ قدرة الى حد 25 MVA من الجــزء الأخر . لاحظ أن الفولتية المستعملة هي فولتية المنظومة المقننة وليست الفولتية بين طرفي طور واحد من الملف المفاعل .

$$\text{عامل التيار المفرط} = \frac{\text{ج.م.ت تيار عطل نافذ متماثل}}{\text{التيـــار المقنـــن}}$$

$$= 187·5/25 = 7·5$$

زمن التيار المفرط هو الزمن بالثواني الذي يمكن ان يتحمله الملف المفاعل عندما يكـون إحاملاً تيار العطل المذكور اعلاه بدون أن يصيبه إي تلف . الزمن النموذجي هو 3 ثوان . اذا اعتمدنا على أنه خلال عطل يستمر على الاغلب ثواني قليلة فقط فان المحول سيمتص كل تأثير الحرارة الناتج من I^2Rt (بدون تشتيت أي شيء) والعلاقة بين تيار العطل وزمن العطل المسموح به يمكن أن تعطى بصورة تقريبية بالعلاقة I^2t = ثابتا . هذا يدل على ان الملف المفاعل يمكن أن يحمل نصف تيار العطل أعلاه لمدة حوالي 12 ثانية . والملف يجب أن يصمم لكي يقاوم القوى الكهرومغناطيسية المقابلة الى

2.55 × ج.م.ت التيار المقنن × عامل التيار المفرط

= 2.55 × ج.م.ت . تيار العطل النافذ المقنن المتماثل .

سبب وجود العامل 2.55 مبين في مناقشة تقطيع الدائرة في الجزء 2.

الملفات المفاعلة المحددة للتيـار يجـب أن تكون لها مفاعلة ذات قيمة عالية كي تحد من تيار العطل ولكنها يجب ان لاتكون عالية جدا بحيث تسبب هبوط فولتية زائداً بسبب تيار الحمل . استعمال ملفات مفاعلة لجزء من قضيب التوزيع كما مبين في الشكل 8.2 شيء مألوف لكل مستويات الفولتية . وتوضع الملفات المفاعلة أحيانا في اجزاء من شبكة التوزيع اما لـكي تحد من مستوى العطل أو لتسيطر على قسمة تيار الحمل بين الخطـوط المتوازية التي تكون حلقة مغلقة بين المحطتين .

اذا كانت X هي مفاعلة الملف المفاعل بالاوم / طور و I هو التيار المقنن الحراري (الحمل) بالامبير و V هي فولتية خط – محايد المقننة للمنظومة فآنئذ عند التيار المقنن تكون الفولتية بين طرفي طور واحد $= IX$ فولت

$$= IX/V \text{ p.u.} = X_{pu}$$

الفولت أمبير المتفاعلة الثلاثية الطور الـكلية .

$$= 3(IX)I = 3I^2X \text{ VAr}$$
$$= 3I^2X/(3VI) = X_{pu}$$

وهكذا ففي المثال 8.2 يجب ان يكون للملف المفاعل عطل نافـذ مقنـن 187.5 MVA (9.85 كيلو أمبير عند خط 11 كيلوفولت) . وتقنين حمل نافذ 25 MVA

(1·31 كيلوأمبير عند خط 11 كيلوفولت) وفولتية بين طرفي طور واحد مقدارها 5·3 % من $11/\sqrt{3}$ كيلوفولت = 337 فولت = $0·258 \times 1310$ فولت و MVAr مقنــن ذو
5·3 % من MVAr $3 \times 1·31 \times 0·337 = 1·323$ MVAr = 25 MVA

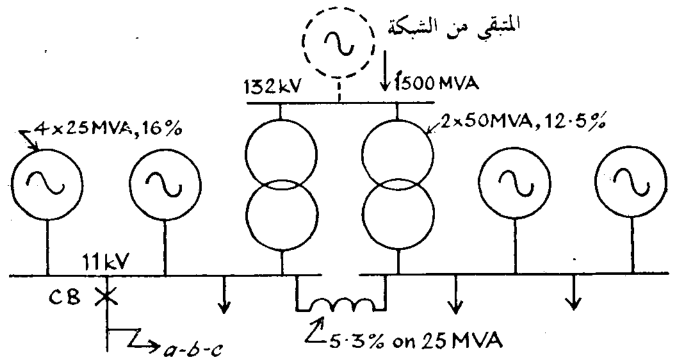
8.2.3 التغذيات الداخلة للعطل : ممانعة المصدر

FAULT IN-FEEDS: SOURCE IMPEDANCE

الشكل 8.2 يبين تخطيطاً لمحطة قدرة سابق لمنتصف الثلاثينات . كل محطة تجهز الحمل الخاص بها بصورة منفصلة عن محطات القدرة الأخر . في منتصف الثلاثينات تم أنشاء شبكة الـ 132 كيلوفولت لربط محطات القدرة الكبيرة الواحدة بالأخرى وشكل 8.3 يبين الترتيب النموذجي لذلك . كل من اجزاء قضبان التوزيع ذات الـ 11 كيلوفولت مربوط الى الشبكة خلال محول ذي 50 ميكا فولت أمبير ومفاعلة 12·5 % . ماتبقى من منظومة الشبكة مبين (المنقط) بوصفه منوباً مكافئاً . اذا حدث عطل ثلاثي الطور على قضيب التوزيع ذي الـ 132 كيلوفولت فان الـ MVA المغذاة الى العطل بوساطة هذا المنوب المكافيء (ولكن باستثناء محطة القدرة المبينة) تدعى بتغذية الشبكة الكبرى الداخلة وهي طريقة غير مباشرة لاعطاء ممانعة المصدر لهذا المنوب المكافيء . وهكذا فاذا كانت تغذية الشبكة الكبرى الداخلة تســاوي 1500 MVA فعندئذ اذا أخذنا الأســاس 100 MVA تكون تغذية الشبكة الكبرى الداخلة مقاســة بالـ MVA =1500/100=15 بنسبة الوحدة ومفاعلة مصدر الشبكة الكبرى 1/15 = 0·0667 = بنسبة الوحدة . شكل 8.4 يبين المنظومة مصغرة الى قضيب توزيع ق.د.ك مشترك ومع كل المفاعلات معبراً عنها بنسبة الوحدة على أساس 100 MVA لقد بينا في الملحق 1 أن مفاعلات المكائن تتناسب مع الـ MVA الأساس .تصغير الشبكة الى مفاعلة واحدة سيتضمـــن استعمال تحويله نجمي – مثلثي . – انظر الملحق 2 –

مثال محلول *8.3*

احسب مستوى العطل لدائرة قصيرة ثلاثية الطور متماثلة على مغذ فولتيته 11 كيلوفولت في المنظومة المبينة في الاشكال 8.3 و 8.4



شكل 8.3 تغذية الشبكة الكبرى الداخلة الى العطل

الحـــل

الأساس 100 ميكافولت أمبير

بابدال المفاعلات بنسبة الوحدة المربوطة مثلثيا الى العقد 2 و 3 و 4 بمجموعة مربوطة نجميا ذات عقدة نقطة تفرع نجمي مرقمة 5 فعندئذ تكون الأخيرة

$$X_{25} = (0{\cdot}25 \times 0{\cdot}25)/0{\cdot}712 = 0{\cdot}0878 \text{ p.u.}$$
$$X_{35} = X_{45} = (0{\cdot}25 \times 0{\cdot}212)/0{\cdot}712 = 0{\cdot}0743 \text{ p.u.}$$

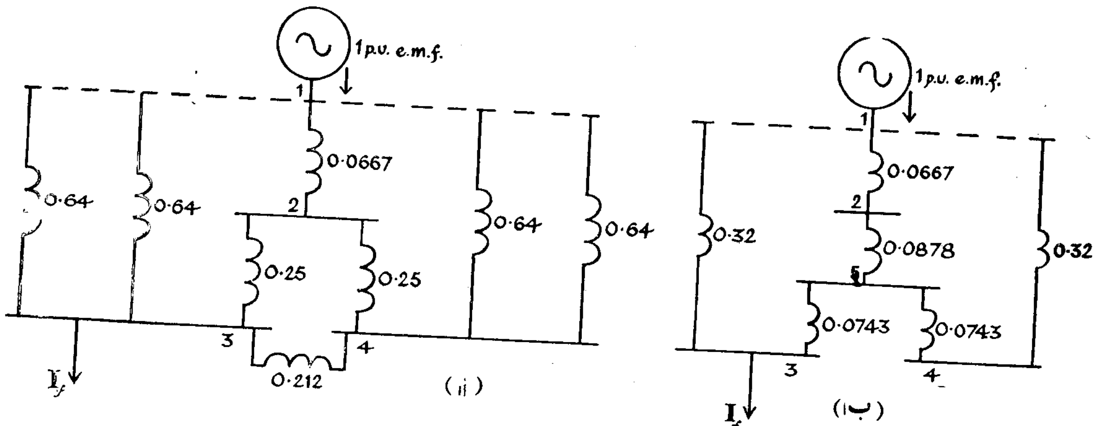
من الشكل 8.4 (أ) و (ب) نرى ان هناك مفاعلتين على التوازي بين العقدتين 1 و 5 مقدارهما ($0{\cdot}0667 + 0{\cdot}0878$) و ($0{\cdot}32 + 0{\cdot}0743$) أي

$$(0{\cdot}1545 \times 0{\cdot}3943)/(0{\cdot}0667 + 0{\cdot}0878 + 0{\cdot}32 + 0{\cdot}0743) = 0{\cdot}1105 \text{ p.u.}$$

المفاعلتان المربوطتان بين العقدتين 1 و 3 ستكونان 0·32 على التوازي مـــع $(0{\cdot}1105 + 0{\cdot}0743)$ اي $(0{\cdot}32 \times 0{\cdot}1848)/0{\cdot}5048 = 0{\cdot}117$ p.u.

مستوى العطل بالـ MVA عند مغذي الـ 11 كيلوفولت قرب قاطع الدورة (اي العقدة 3) تبعا لذلك سيكون $100/0{\cdot}117 = 855$ ميكا فولت امبير .

هذا يبين اننا نحتاج الى رفع – مقنن قواطع الدورة عند طرف تجهيز مغذيات الـ 11 كيلوفولت الى الحجم القياسي التالي اي 1000 ميكا فولت امبير .



شكل 8.4 (أ) الدائرة المكافئة لشكل 8.3 محسوبة على الاساس 100 ميكافولت امبير (ب) الد ائرة المكافئة المبسطة .

خلال الفترة التي كان الطلب فيها على الكهرباء يتضاعف كل 8 الى10 سنوات تقريبا تمت اضافة محطات قدرة وخطوط نقل جديدة الى منظومة الشبكة الكبرى . لذلك فان الممانعة الداخلية لمنظومة الشبكة الكبرى قد هبطت وازداد مستوى العطل لها . كذلك . ففي اية سنة يكون مستوى العطل اعلى ما يمكن عندما تشتغل الشبكة الكبرى تحت ظروف المحمل الاقصى (الذروة) ويكون ذلك عادة في شهر كانون الاول اوكانون الثاني . تحت هذه الظروف سيحسب مستوى العطل عند كل قضبان التوزيع الرئيسية في منظومة الشبكة الكبرى ويشار اليه بمستوى عطل المحطة الاقصى . رغم ان مفاعلة الشبكة الكبرى الدنيا ستترافق مع ظروف حمل الذروة . فسنحصل على مستويات العطل نفسها فيما لوكانت المكائن نفسها تشتغل جميعا ولكن بدون حمل.

8.3 المركبات المتماثلة Symmetrical Components

8.3.1 المباديء العامة

الغالبية العظمى من أعطال منظومة القدرة ليست دوائرقصيرة ثلاثية الطور متماثلة ولكنها تحدث بين خط واحد والارض والاقل شيوعا هي التي تحدث بين الخطوط والتي قد تشمل الارض ايضا . وتوجد عادة ممانعة عطل محدودة بدلا من دائرة قصيرة وهكذا فبدلا من دائرة ثلاثية الطور متوازنة تماما يمكن حلها بحساب التيار الجاري في احد الاطوار الثلاثة كما في الفقرة 8.2 يجب ان نحل الان دئرة ثلاثية الطور غيرمتوازنة.

هذا في بريطانيا يقابلة في العراق شهر تموز أو شهر اب (المترجمان)

الطريقة المناسبة لحلها هي ان نستعمل المركبات المتماثلة لمنظومة غير متوازنة من التيارات والفولتيات لان ذلك سينتج ثلاث شبكات (وهمية) طور واحد احداها فقط ستحتوي على فولتية دافعة (ق . د . ك) . ممانعات هذه الشبكات الثلاث بعضها يختلف عن تلك التي تستعمل في تحليلات الشبكات الثلاثية الطور المتوازنة تماما والتي عند استعمالها او تعريفها يجب ان تسبق كلها بكلمتي « التتابع الموجب » بالتحديد). فمثلا قد بينا في الفصل 7 ان الماكنة التزامنية تحت ظروف متوازنة يمكن ان تعتبر وكأن لها مفاعلات مؤثرة تدعى التزامنية والعابرة ودون العابرة عند مختلف الازمنة وهذه كلها هي مفاعلات التتابع الموجب ولكن عندما يكون التيار غير متوازن فسنحتاج الى مفاعلات اخرى كذلك (الفقرة 7.6). فيما يخص المعدات الاخرى فان هذه المفاعلات الاخر قد تمت مناقشتها في الفصول الخاصة بها التي تتعامل مع تلك الاجهزة (الفقرات 2.6 و 3.7 و 6.10) وستناقش استعمالاتها في هذا الفصل (الفقرات 8.3.2 و8.3.3 و8.3.4) .

طريقة المركبات المتماثلة يمكن ان تطبق على ايه منظومة متعددة الاطوار حاوية على اي عدد من الاطوار ولكن منظومة الاطوار الثلاثة هي الوحيدة ذات العلاقة هنا . يمكن تطبيق هذه الطريقة على مجموعة من التيارات او الفولتيات الثلاثية الطور غير المتوازنة وسنستعملها لكليهما في هذا الفصل (الفقرة 8.4) رغم ان المعادلات التي تربط الكميات الاصلية (الحقيقية او الفيزياوية) الى مركباتها المتماثلة سينص عليها بدلالة التيارات . المركبات المتماثلة لتيار العطل يمكن ان يقال عنها أنها وهمية اذ ان قياس تيار الخط مباشرة سيعطينا التيار الحقيقي والذي قد يكون غير متوازن أي غير متساو في المقدار مع تياري العطل الاخرين ولا يبعد 120° عن اي منهما او لايبعد 120° عن اي منهما فقط . من ناحية اخرى فمن الممكن الحصول على قياس لاي من المركبات المتماثلة لتيار (او فولتية) غير متوازن بربط دائرة القياس التي لاتجري فيها المركبات الاخرى (وهذا يجب ان يعمل لبعض الدوائر في منظومات القدرة . انظر الفقرة 8.5)

نظرية المركبات المتماثلة تنص على انه . باستعمال مبدأ التراكب في الشبكات الخطية فان اي مجموعة من المطاورات الثلاثية الطور غير المتماثلة ذات تتابع *abc* مثلا التيارات $\mathbf{I}_a$ و $\mathbf{I}_b$ و $\mathbf{I}_c$ يمكن ابدالها بحاصل جمع ثلاث مجموعات من التيارات :

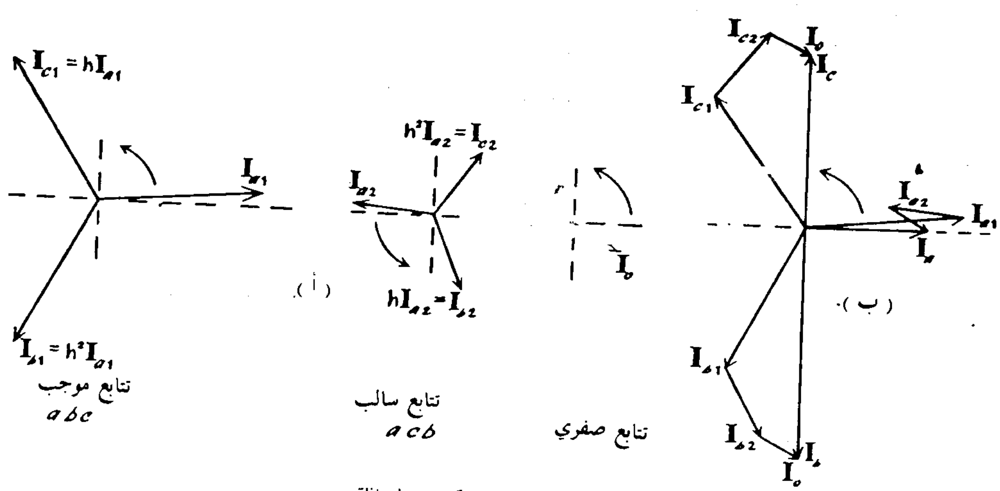
(i) مجموعة تتابع موجب ذات ثلاثة تيارات ثلاثية الطور متماثلة (أي متساوية كلها

رقمياً ومزاحة بعضها عن بعض بمقدار $120°$) لها التتابع نفسه abc كما في المجموعة الأصلية ويرمز لها بـ $\mathbf{I}_{a1}$ و $\mathbf{I}_{b1}$ و $\mathbf{I}_{c1}$.

(ii) مجموعة تتابع سالب ذات ثلاثة تيارات ثلاثية الطور متماثلة لها تتابع معاكس لتلك التي في المجموعة الاصلية اي acb ويرمز لها بـ $\mathbf{I}_{a2}$ و $\mathbf{I}_{b2}$ و $\mathbf{I}_{c2}$.

(iii) مجموعة تتابع صفري ذات ثلاثة تيارات كلها متساوية في المقدار والطور اي ليس لها تتابع ويرمز لها بـ $\mathbf{I}_{a0}$ و $\mathbf{I}_{b0}$ و $\mathbf{I}_{c0}$ وكلها تساوي $\mathbf{I}_0$.

شكل 8.5 (أ) يوضح المجموعات الثلاث من المركبات المتماثلة . سنبين مؤخرا ان القيم النسبية لمركبات التيار الثلاثة في اي خط (I_{a1} و I_{a2} و I_{a0}) وزوايا الطور النسبية بينهما ستتغير من ظرف عطل غير متماثل الى اخر . شكل 8.5 (أ) لذلك يوضح مجموعة ظروف خاصة واحدة فقط . يجب ان يلاحظ انه رغم ان التتابع acb للتتابع السالب يكون معاكسا للتتابع الموجب فان مجموعة مطاورات التتابع السالب يجب ان تؤخذ على انها تدور باتجاه (عكس اتجاه عقرب الساعة) مطاورات التتابع الموجب (اوالصفري) نفسه.



شكل 8.5 المركبات المتماثلة

(أ) مركبات التتابع (ب) جمع مركبات التتابع

عند اضافة تيارات التتابع السالب الى تيارات التتابع الموجب تكون المحصلة مجموعة من ثلاثة تيارات ثلاثية الطور غير متماثلة ولكن المجموع الطوري لهذه التيارات الثلاثة سيكون صفرا لان كلا مجموعتي المركبات هي مجموعات ثلاثية الطور متماثلة اي انه اذا كان .

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}$$
$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_{b1}+\mathbf{I}_{b2}$$
$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{c1}+\mathbf{I}_{c2}.$$

فالجمع يعطينا

$$\mathbf{I}_a+\mathbf{I}_b+\mathbf{I}_c = 0+0.$$

وهكذا فتحت ظروف عدم التوازن ستكون هناك . بصورة عامة . محصلة تيار كلية هي حاصل جمع تيارات الخط الثلاثة . مثلاً عندما يكون هناك عطل أرضي . التيار الجاري في مسار الأرضي والذي هو حاصل جمع تيارات الخط الثلاثة يجب أن يكون حاصل جمع تيارات التتابع الصفري الثلاثة لأن حاصل جمع مركبات التتابع الموجب والسالب هو صفر . وهكذا فتيار المسار الأرضي يساوي

$$= \mathbf{I}_{a0}+\mathbf{I}_{b0}+\mathbf{I}_{c0}$$
$$= 3\mathbf{I}_{a0} = 3\mathbf{I}_0. \qquad [8.7]$$

المجموعات الثلاث لتيارات التتابع كل منها متماثل بنفسه ويمكن أن تحسب على أساس الطور الواحد (او لكل طور نجمي) مع تيار فعلي يمر في أي من الأطوار معطى بحاصل جمع تيارا ت التتابع الثلاثة الخاصة به . أي

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0}$$
$$\mathbf{I}_b = \mathbf{I}_{b1}+\mathbf{I}_{b2}+\mathbf{I}_{b0} \qquad [8.8]$$
$$\mathbf{I}_c = \mathbf{I}_{c1}+\mathbf{I}_{c2}+\mathbf{I}_{c0}.$$

شكل 8.5 (ب) يبين تفاصيل التيارات غير المتوازنة التي حصلنا عليها بجمع المركبات المتماثلة المبينة في شكل 8.5 (أ) .

بأستعمال المدور h المناقش في الملحق 3 فالمعادلات [8.8] ستختزل الى

$$\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0}$$
$$\mathbf{I}_b = h^2\mathbf{I}_{a1}+h\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0} \qquad [8.9]$$
$$\mathbf{I}_c = h\mathbf{I}_{a1}+h^2\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0}.$$

في طريقة المركبات المتماثلة تكون المعادلات أبسط فيما لو أخذنا بنظر الأعتبار الأعطال التي تكون متماثلة نسبة الى طور واحد فقط (سنرى أن هذا صحيح لكل الأعطال التي سنتبصر بها في هذا الفصل) وهذا الطور سيعتبر الطور المرجع ويدعى الطور a (سواء كان R او Y او B أعتماداً على المنظومة الأصلية) .

المعادلات الثلاث في [8.9] يمكن أن تحل الآن لأيجاد مركبات التيار الثلاث بدلالة التيارات الثلاثة للمنظومة الفعلية على شرط أن المحدده

$$\begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ h^2 & h & 1 \\ h & h^2 & 1 \end{vmatrix} \neq 0.$$

على الطالب أن يثبت بنفسه ان المحدّدة لها قيمة تساوي $j\,3\sqrt{3}$ ولاتساوي صفراً. لكي نجد $\mathbf{I}_{a1}$ فأن المعادلة الثانية في [8.9] يجب أن تضرب بالمدور h. والمعادلة الثالثة h^2 وهاتان المعادلتان يمكن أن يضافا الى المعادلة الأولى . والنتيجة تكون

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_{a1} &= (1/3)(\mathbf{I}_a + h\mathbf{I}_b + h^2\mathbf{I}_c) \\ \mathbf{I}_{a2} &= (1/3)(\mathbf{I}_a + h^2\mathbf{I}_b + h\mathbf{I}_c) \\ \mathbf{I}_{a0} &= (1/3)(\mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c). \end{aligned} \qquad [8.10]$$

باستعمال [8.10] على الطالب أن يبين أنه اذا كانت التيارات الفعلية تكون مجموعة ثلاثية الطور متماثلة فأنها ستحتوي على مركبات تتابع موجب فقط . وعلى الطالب أن يبين كذلك أنه لاتوجد مركبا ت تتابع صفري للتيار في منظومة ثلاثة أسلاك ثلاثية الطور ليست لها تيارات تسرب أو شحن الى الأرض . (الطلاب المتمرسون في أستعمال المصفوفات يجب أن يكتبوا المعادلات [8.9] بهيأة مصفوفة وبقلب المصفوفة يحصلون على [8.10]) .

المركبات الثلاث المذكورة للتيار في طور a يمكن أن تعد كأنها جارية في ثلاث دوائر وهمية مفردة الطور مقترنة مع بعضها عند نقطة العطل بطريقة تعتمد على طبيعة العطل . اذا كان هناك أي تقارن متبادل بين هذه الشبكات الثلاث فأن التحليلات ستكون أكثر تعقيدا . لذلك فقبل التبصر في مثل هذه الشبكات سنتبصر في الظروف التي عندها لاوجود للتقارن المتبادل فيما بينها وسنبين أننا سنواجه مثل هذه الظروف في منظومة القدرة . يكفي أن نتبصر في مركبات التيار $\mathbf{I}_{a1}$ و $\mathbf{I}_{a2}$ و $\mathbf{I}_{a0}$. حيث أن تياري الطورين b و c يمكن أن يوجدا من [8.9] .

8.3.2 الظروف التي لايوجد فيها تقارن متبادل بين شبكات التتابع الثلاث

CONDITIONS FOR NO MUTUAL COUPLING BETWEEN THE THREE SEQUENCE NETWORKS

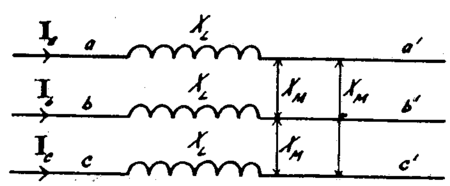
شكل 8.6 يبين منظومة ثلاثية الطور لها مفاعلة حثية ذاتية متوازنة / X_L / طور ومفاعلة حثية متبادلة X_M بين أزواج الأطوار . تيارات الخط هي $\mathbf{I}_a$ و $\mathbf{I}_b$ و $\mathbf{I}_c$ والتي يمكن ان تكون غير متوازنة .

$$\mathbf{V}_{aa'} = \mathbf{I}_a\mathbf{X}_L + \mathbf{I}_b\mathbf{X}_M + \mathbf{I}_c\mathbf{X}_M$$
$$\mathbf{V}_{bb'} = \mathbf{I}_a\mathbf{X}_M + \mathbf{I}_b\mathbf{X}_L + \mathbf{I}_c\mathbf{X}_M$$
$$\mathbf{V}_{cc'} = \mathbf{I}_a\mathbf{X}_M + \mathbf{I}_b\mathbf{X}_M + \mathbf{I}_c\mathbf{X}_L$$

حيث أن $\mathbf{X} = j\,X$ . .

مركبة التتابع الموجب لهبوط الفولتية المتوالي . مع $\mathbf{V}_{aa'}$ بوصفها مطاوراً مرجعاً.ستكون (من [8.9])

$$\begin{aligned}\mathbf{V}_{aa'1} &= \tfrac{1}{3}(\mathbf{V}_{aa'} + h\mathbf{V}_{bb'} + h^2\mathbf{V}_{cc'}) \\ &= \tfrac{1}{3}[\mathbf{X}_L(\mathbf{I}_a + h\mathbf{I}_b + h^2\mathbf{I}_c) - \mathbf{X}_M(\mathbf{I}_a + h\mathbf{I}_b + h^2\mathbf{I}_c)] \\ &= \mathbf{I}_{a1}(\mathbf{X}_L - \mathbf{X}_M).\end{aligned}$$



شكل 8.6 منظومة ثلاثية الطور ذات ممانعات متوازنة

مفاعلة التتابع الموجب طور يمكن أن تعرف كمايلي

$$\mathbf{X}_1 = \mathbf{V}_{aa'1}/\mathbf{I}_{a1} = \mathbf{X}_L - \mathbf{X}_M.$$

وبالتشابه فأن مفاعلة التتابع السالب طور =

$\mathbf{X}_2 = \mathbf{X}_L - \mathbf{X}_M = \mathbf{X}_1$ (للأجهزة الساكنة)

ومفاعلة التتابع الصفري طور = $\mathbf{X}_0 = \mathbf{X}_L + 2\mathbf{X}_M$

معادلة $V_{aa'}$ يمكن أعادة كتابتها بدلالة مركبا ت التتابع للتيار كما يلي

$$\begin{aligned} V_{aa'} &= X_L(I_{a1}+I_{a2}+I_{a0})+X_M(-I_{a1}-I_{a2}+2I_{a0}) \\ &= I_{a1}(X_L-X_M)+I_{a2}(X_L-X_M)+I_{a0}(X_L+2X_M) \\ &= I_{a1}X_1+I_{a2}X_2+I_{a0}X_0. \end{aligned} \quad [8.11]$$

النتيجة في [8.11] تبين أن كل تتابع تيار يسبب هبوط فولتية لتتابعه فقط شريطة أن تكون مفاعلات المنظومة متوازنة من نقاط التوليد صعوداً الى العطل و كما هي الحال في منظومة القدرة . بناءً على ذلك فانه لايوجد تقارن متبادل بين شبكات التتابع الثلاث . ويمكن الوصول للنتيجة نفسها بطريقة أكثر دقة باستعمال طرق المصفوفة مع ممانعة في المحايد وتقارن متبادل بين الخطوط الثلاثة واشتمال المحايد . هذه المسألة ستترك للجزء الثانـي حيث أننا سنتعامل مع تحويلا ت اخرى لمنظوما ت مناظرة باستعمال طرق المصفوفة .

8.3.3 شبكات التتابع الثلاثة . THE THREE SEQUENCE NETWORKS

لقد بينا في الفقرة 8.3.2 أن تيارات التتابع الموجب لاتتسبب في وجود فولتيـات ذات تتابع سالب أو صفـري وان تيارا ت التتابـع السالـب تعطـــي فولتيـا ت تتابع سالب فقط وتيارات التتابـع الصفري تعطـي فولتيا ت تتابـــع صفري فقط. لذلك يمكننا أن نعد كل تيار كأنه سيجري ضمن شبكته وخلال ممانعات تتابعه فقط . مثل المفاعلات X_1 و X_2 و X_0 المشار اليها في الفقرة 8.3.2 .

ان دراسة ملفات ماكنة تزامنية تبين لنا أن الماكنة الاعتيادية وبدون أي عطل ستولدق . د . ك. متوازنة ذات تتابع اعتيادي أي تتابع موجب abc فقط . وهكذا فان ق . د . ك E_{an1} فقط ستتولـد في دائـرة تتابـع موجب لطور a و E_{an2} و E_{an0} ستكونان صفرا . E_{an1} هي ق . د . ك لخط الى محايد للمولد . Z_1 في شكل 8.7 هـي ممانعـــة التتابع الموجـب المفردة التـي ستظهر بين التوليـد ونقطـة العطل عند اختصار ممانعا ت المنظومة كافـــة وكما نوقشـت فـي الفقـرة 8.2 (بما أن المنظومـة متوازنـــة فان $Z_{a1} = Z_{b1} = Z_{c1} = Z_1$ وبالتشابه بالنسبة للتتابعين الآخرين) . فولتية التتابع الموجب للطور a الى الأرضي عند نقطة العطل V_{ae1} تكون تبعا لذلك كما يلي : –

$$\mathbf{V}_{ae1} = \mathbf{E}_{an1} - \mathbf{I}_{a1}\mathbf{Z}_1. \qquad [8.12]$$

بما أن $\mathbf{E}_{an2} = 0$ فيما يخص التتابع السالب فإن مركبة التتابع السالب لطور a الى الأرضي عند نقطة العطل هي

$$\mathbf{V}_{ae2} = -\mathbf{I}_{a2}\mathbf{Z}_2. \qquad [8.13]$$

أما فيما يخص التتابع الصفري فاذا اعتبرنا المصدر منوباً مفرداً ذا نقطة نجمية مؤرضة خلال ممانعة $\mathbf{Z}_n$ فعندئذ تبين لنا المعادلة [8.7] أن $\mathbf{Z}_n$ تحمل تياراً مقداره $3\mathbf{I}_{a0}$ مسببة هبوط فولتية مقداره $3\mathbf{I}_{a0}\mathbf{Z}_n$. ولكي نعطي هبوط الفولتية نفسه فان شبكة التتابع الصفري لشكل 8.7 تبعاً لذلك يجب أن تحتوي على ممانعة $3\mathbf{Z}_n$ وكما مبين . لذلك

$$\mathbf{V}_{ae0} = -\mathbf{I}_{a0}(\mathbf{Z}_0 + 3\mathbf{Z}_n) = -\mathbf{I}_{a0}\mathbf{Z}'_0 \qquad [8.14]$$

وفرق الجهد بين طور a والأرض عند نقطة العطل هو $\mathbf{V}_{ae}$ ويحسب كما يلي :-

$$\mathbf{V}_{ae} = \mathbf{V}_{ae1} + \mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = \mathbf{E}_{an1} - \mathbf{I}_{a1}\mathbf{Z}_1 - \mathbf{I}_{a2}\mathbf{Z}_2 - \mathbf{I}_{a0}\mathbf{Z}'_0. \qquad [8.15]$$

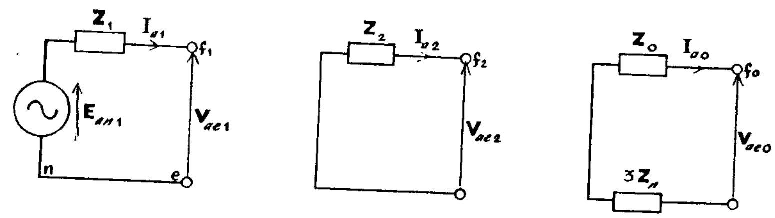
وبالطريقة نفسها يمكننا ايجاد V_{be} و $\mathbf{V}_{ce}$ من [8.9]

$$\mathbf{V}_{be} = \mathrm{h}^2\mathbf{V}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = \mathrm{h}^2(\mathbf{E}_{an1} - \mathbf{I}_{a1}\mathbf{Z}_1) - \mathrm{h}\mathbf{I}_{a2}\mathbf{Z}_2 - \mathbf{I}_{a0}\mathbf{Z}'_0 \qquad [8.16]$$

و

$$\mathbf{V}_{ce} = \mathrm{h}\mathbf{V}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = \mathrm{h}(\mathbf{E}_{an1} - \mathbf{I}_{a1}\mathbf{Z}_1) - \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{a2}\mathbf{Z}_2 - \mathbf{I}_{a0}\mathbf{Z}'_0. \qquad [8.17]$$

نقطة اختلاف واحدة نشأت لدينا لحد الآن بين شبكات التتابع الصفري والسالب . ستنشأ لدينا نقاط اختلاف اخرى عندما سندرس باختصار في الفقرة اللاحقة كيفية الحصـول علـى الممانعـات Z_1 و Z_2 و Z_0 لمنظومة قدرة ذات صنوف متعددة من الاجهزة المترابطة .



شكل 8.7 شبكات التتابع الثلاث

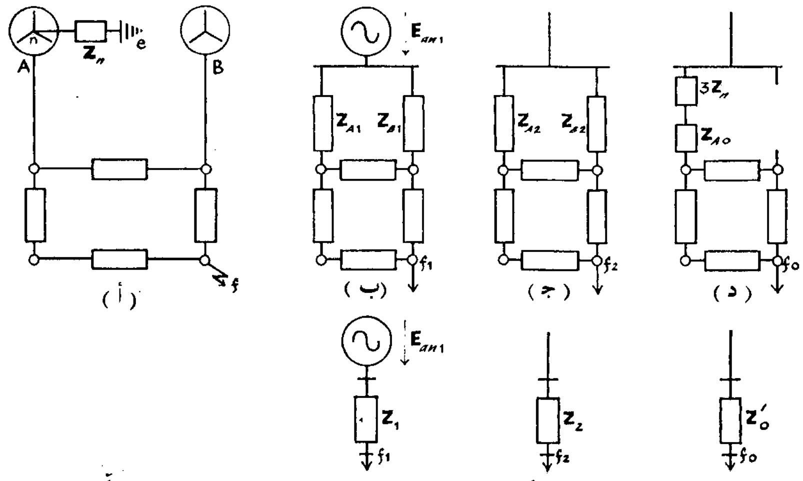
من الواضح أنه سوف لا يجري أي تيار في شبكات التتابع الثلاث عندما تكون معزولة عن بعضها وكما مبين في شكل 8.7 ولكن في الفقرة 8.4 سنشتق الترابط الداخلي لهذه الشبكات لكي نمثل ظروف عطل غير متوازن مختلفة .

8.3.4 Z_1 , Z_2 , Z_0 لمنظومة قدرة مترابطة بينيا

Z_1, Z_2 AND Z_0 FOR AN INTERCONNECTED POWER SYSTEM

عملية اختزال ممانعات التتابع الموجب / طور لشبكة مترابطة الى ممانعة واحدة بين التوليد ومكان العطل هي بالضبط ماتعاملنا معه في الفقرة 8.2 على أننا لم نذكر ذلك في حينه كل الممانعات كانت في الحقيقة ممانعات تتابع موجب للأجهزة .

كل الأجهزة الساكنة لها الممانعة نفسها لتيار التتابع السالب كما لتيار التتابع الموجب (انظر الفقرات 2.6 و 3.7 و 6.10 . أما بالنسبة للمكائن التزامنية فان مفاعلة التتابع الموجب تتغير مع الزمن (الفقرة 7.6) ومفاعلة التتابع السالب ليست بالضرورة مساوية لها على أن الفرق بينهما قد يكون صغيراً خلال الدورات القليلة الاولى بعد حدوث العطل . مخطط دائرة التتابع السالب يكون مطابقاً لشبكة التتابع الموجب لأن كلا المنظومتين ثلاثية الطور متوازنة وسيختلفان فقط في قيم مفاعلات المكائن التزامنية وفي نقص الـ ق . د . ك . في التتابع السالب (انظر شكل 8.8 (ب) و (جـ) . وبذلك فان Z_2 يمكن ايجادها بعملية الاختزال نفسها المتبعة سابقاً وجعلها ممانعة واحدة بدمج العناصر التي على التوالي والتي على التوازي وباستعمال تحويلات · مثلثي – نجمي ·



شكل 8.8 عطل غير متوازن في منظومة مترابطة بينياً
(أ) المنظومة (ب) شبكة التتابع الموجب
(جـ) شبكة التتابع السالب (د) شبكة التتابع الصفري

من ناحية ثانية فان شبكة التتابع الصفري التي لها نقطة تفرع نجمي غير مؤرضة لملفات منوب أو محولة ستجعل الممانعة Z_0 لانهائية لذلك الجزء من الدائرة وذلك لعدم وجود مسلك الى الأرض أي أن $I_0 = 0$ (انظر [8.7] والفقرة 6.10) . لذلك ففي شبكة التتابع الصفري لشكل 8.8 (د) لاتظهر ممانعة التتابع الصفري للمنوب B لأنها مربوطة على التوالي مع ممانعة لانهائية . تكون لشبكة التتابع الصفري بصورة عامة قيم ممانعة لكل صنف من الاجهزة تختلف عن تلك التي لشبكة التتابع الموجب (أنظر الفقرات 2.5 و3.7 و 6.10 و 7.6) على أنه في بعض المحولات تؤخذ قيم الممانعة على أنها متساوية (انظر الفقرة 6.10) . اذا كان المحلول ملفات مربوطة مثلثيا فان شبكة التتابع الصفري ستكون مفتوحة أيضا لان تيارات التتابع-الصفري تدور حول الملفات المربوطة مثلثياً ولاتجري في الدائرة الثلاثية الطور المربوطة بها . وهذا تمت مناقشته في الفقرة 6.10

المنوب هو الجهاز الوحيد الذي له مفاعلة متغيرة مع الزمن لتيار التتابع الموجب المفاعلة دون العابرة هي التي تستعمل في شبكة التتابع الموجب اذا أردنا مثلا ايجاد القوى الميكانيكية القصوى خلال فترة العطل آخذين في الحساب مركبة الـ d.c كذلك . وتستعمل المفاعلة العابرة عادة خلال فترة اشتغال منظومة الحماية وفتح قاطع الدورة . وليس من الضروري دائما الأخذ بنظر الأعتبار أي تغير في مفاعلات التتابع السالب

والصفري للمكائن التزامنية خلال الفترات دون العابرة والعابرة والحالة المستقرة لذلك فان قيمة واحدة لـكل منها تكون كافية .

يمكننا الان تلخيص عملية حساب تيـارات وفولتيات العطل غير المتوازن في اي جزء من منظومة القدرة كما يلي :

(أ) حدد شبكات التتابع الثلاث من مكان التوليد الى نقطة العطل بفحص مخـطط المنظومة .

(ب) ضع ممانعات التتابع في كل من الشبكات الثلاث .

(ج) أختزل كل شبكة الى ممانعة مفردة أي Z_1 و Z_2 و Z_0 .

(د) اربط شبكات التتابع هذه سوية مع أي ممانعة عطل بالطريقة المبينة في الفقرة 8.4 لـكي تنطبق على العطل غير المتوازن المحدد .

(هـ) احسب مركبات التتابع للتيـــار في طور a عند نقطة العطل .

(و) احسب مركبات التتابع للتيار في طور a في أي فرع من شبكات التتابع عن طريق حسابها تراجعيا من نقطة العطل .

(ز) احسب التيار الفعلـي لأي طور لأي فرع من الدائرة باستعمال [8.9] .

(ح) احسب مركبات التتابع ف. ج. بين طور a والأرضي عند أي نقطة في المنظومة باستعمال [8.12] و [8.13] و [8.14] .

(ط) احسب ف.ج. الفعلي بين أي طور والارضي عند أي نقطة في المنظومة باستعمال [8.15] و [8.16] و [8.17] .

8.3.5 انحراف الطور خلال محول مثلثي – نجمي

PHASE-SHIFT THROUGH A DELTA/STAR TRANSFORMER

لقد بينا في الفقرة 6.3 وشكل 6.4 أن فولتية الخط الى محايد الابتدائية المكافئة لمحول Dy1 (أي فولتية الطور لمنوب مربوط نجمياً المجهز لأبتدائي مثلثي) كانت سابقة بزاوية مقدارها 30° لفولتية الخط الى محايد الثانوية المناظرة . سنبين الان أن تيارات التتابع الموجب في الخطوط الابتدائية هي كذلك سابقة بزاوية 30° لتيارات خط التتابع الموجب الثانوية المناظرة لها . على الطالب ان يجد بنفسه أنه اذا كانت k تساوي نسبة لفات طور الى طور (N_s/N_p) فان نسبة فولتية العطل المناظرة ستكون $\sqrt{3}.k$.

تيارات التتابع الموجب في الثانوي هي $\mathbf{I}_{a1}$ $= h^2\mathbf{I}_{a1}$ $\mathbf{I}_{c1} = h\mathbf{I}_{a1}$. وبضرب هذه التيارات بالثابت k سنحصل على تيارات الطور الابتدائية المناظرة وبطرحها كازواج سنحصل على تيارات العطل . وبذلك

$$\mathbf{I}_{A1} = k\mathbf{I}_{a1} - kh^2\mathbf{I}_{a1} = k\mathbf{I}_{a1}(1-h^2) = \sqrt{3}\,.\,kI_{a1}\underline{/+30^\circ}$$

ان الانحراف في فولتية وتيار التتابع الموجب بالمقدار نفسه وبالاتجاه نفسه هو المتوقع نظرا لان تيار التتابع الموجب يمثل تيار الحمل وعامل قدرة الحمل سوف لن يتغير في المحول المثالي .

على الطالب أن يبين الان ان لتيارات التتابع السالب

$$\mathbf{I}_{A2} = \sqrt{3}\,.\,kI_{a2}\underline{/-30^\circ}$$

وبذلك تكون تيارات التتابع الموجب والسالب قد انحرفت بزاوية 30° في اتجاهات متعاكسة. يجب ان نلاحظ ان عامل التحويل الرقمي هو نسبة فولتية الخط : هذا يجب أن يكون متوقعا لانها هي تحويلة تيار خط ثانوي الى خط ابتدائي . (على الطالب أن يبين الان أنه لمحولة Dy11 (شكل 6.5) سيحصل على النتيجة نفسها الا ان انحراف الطور سيكون الان -30° و $+30^\circ$ على التوالي) . النتائج أعلاه يمكن أن تستعمل عند الحاجة لايجاد توزيع التيار في شبكة معقدة على الجانب الابتدائي في محول مثلثي / نجمي .

توضيح آخر للتطبيق يتم بان تبين ان $\mathbf{I}_a$ هو تيار عطل – أرضي على الجانب الثانوي لتيار عطل أبتدائي مقداره $k\mathbf{I}_a$ (نتيجة واضحة من تعريف k) . فيما يخص العطل الارضي سنوضح في الفقرة 8.4.1 بان $\mathbf{I}_{a1} = \mathbf{I}_{a2} = \mathbf{I}_{a0}$ و $\mathbf{I}_a = \mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0}$ (المعادلة [8.8]) .

وبما انه لاتوجد هناك تيارات تتابع صفري في الخطوط الابتدائية فان

$$\begin{aligned}\mathbf{I}_A &= \mathbf{I}_{A1}+\mathbf{I}_{A2}\\ &= \sqrt{3}\,k\mathbf{I}_{a1}\underline{/+30^\circ} + \sqrt{3}\,k\mathbf{I}_{a2}\underline{/-30^\circ}\end{aligned}$$

$$= k\mathbf{I}_{a1}(1-\mathrm{h}^2)+k\mathbf{I}_{a2}(1-\mathrm{h}) = 3k\mathbf{I}_{a1}$$
$$= k\mathbf{I}_a$$
$$\mathbf{I}_B = \mathbf{I}_{B1}+\mathbf{I}_{B2} = \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{A1}+\mathrm{h}\mathbf{I}_{A2} = 0$$
$$\mathbf{I}_C = -\mathbf{I}_A.$$

8.4 الاعطال غير المتماثلة Asymmetrical Faults

العطل غير المتماثل هو أي عطل عدا العطل المتماثل الثلاثي الطور . مثلا عطل – أرضي على طور واحد اوعطل خط الى خط (اوعطل طور الى – طور ويدعى أحيانا عطل طوري) أوعطل أرضي مزدوج (أوعطل خط الى خط الى أرضي) . يستعمل الترميز a-e لعطل أرضي على طور a و b-c لعطل طوري عبر c و b . المسائل المشتملة على أعطال غير متماثلة تحل عن طريق تحليل تيارات العطل غير المتماثلة الى مركباتها المتماثلة . بعد ذلك تحلل منظومة القدرة ثلاث مرات . مرة لكل من مركبات التتابع الثلاث والنتائج تجمع لـكي تعطي تيار العطل الفعلـي (او فولتيته) .

من المعتاد خلال حسابات العطل غير المتماثل (مالم ينص على نقيض ذلك صراحة) أن نأخذ أفتراضات التبسيط نفسها التي عملناها خلال دراسة الأعطال ثلاثية الطور المتماثلة بالتحديد هو أن كل مصادر ق . د . ك . متساوية (بنظام نسبة الوحدة) ومنطبقة الطور بحيث أنه يمكن ابدالها جميعاً بمصدر ق. د. ك. واحد. واذا أستطعنا أن نهمل كـــل المقاومات فأن المنظومة ستختزل الى مصدر ق. د. ك. مفرد خلف مفاعلة مفردة في شبكة التتابع الموجب .

يجب أن يلاحظ في التحليلات التي تنتج أن الطور المرجع الذي يرمز له بالحرف يكون دائماً الطور المتماثل نسبة الى العطل أي في حالة عطل أرضي فأنه يكون على الطور a بينما يكون الطوران b و c سليمين والعطل الطوري يكون عبر الطورين b و c بينما يكون الطور a سليماً . نعمل ذلـك لـكي نحصل على أبسط النتائج بدلالة الرياضيات. عند تطبيق هذه التحليلات بدلالة الأطوار abc على مسألة عملية بدلالة الأطوار RYB يجب أن نحافظ على التتابع الطوري الصحيح اي أنه اذا كان الطور a هو B فأن b سيكون R و c سيكون Y .

8.4.1 عطل ارضي على الطورa EARTH FAULT ON PHASE a

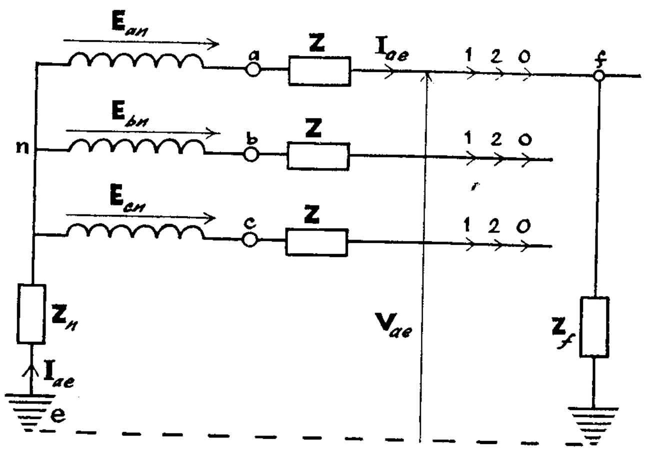
شكل 8.9 يبين منظومة قدرة مبسطة غير محملة ذات عطل أرضي على طور a عند النقطة f . نقطة التفرع النجمي للمصدر مؤرضة عبر ممانعة Z_n (تكون مقاومة عادة) ومسار العطل مبين وكأن له ممانعة Z_f (تكون مقاومة قليلة عادة). القوى الدافعة الكهربائية والممانعات لمنظومة القدرة يفترض أن تكون متوازنة دائما الى حد نقطة العطل وبأستثناء نقطة العطل نفسها بحيث أنه لايكون تقارن متبادل بين شبكات التتابع وكما وكما مبين في الفقرتين 8.3.2 و 8.3.3 . تيار العطل هو I_{ae} . ومركبات التتابع للتيار في كل الأطوار الثلاثة مبينة كذلك .

الطريقة المتبعة هنا وفي التحليلات التالية ستكون بكتابة معادلات الدائرة الثلاث للأطوار a وb وc التي تعرف ظروف العطل بدلالة تيارات وفولتيات الطور الفعلية عن طريق فحص مخطط الدائرة .

$$V_{ae} = Z_f I_{ae} \quad [8.18]$$

$$I_{be} = 0 \quad [8.19]$$

$$I_{ce} = 0. \quad [8.20]$$



شكل 8.9 عطل ارضي على طور a.

وبأستعمال [8.9] هذه الفولتيات والتيارات يمكن أن نستبدل بها مجموع مركباتها المتماثلة والمعادلات [8.18] و [8.19] و [8.20] ستصبح :

$$\mathbf{V}_{ae1}+\mathbf{V}_{ae2}+\mathbf{V}_{ae0} = \mathbf{Z}_f(\mathbf{I}_{ae1}+\mathbf{I}_{ae2}+\mathbf{I}_{ae0}) \qquad [8.21]$$

حيث أن $\mathbf{V}_{ae1}$ و $\mathbf{V}_{ae2}$ و $\mathbf{V}_{ae0}$ هي المركبات المتماثلة لفرق الجهد بين الطور المرجع والارضي عند نقطة العطل f .

$$\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae1}+\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae2}+\mathbf{I}_{ae0} = 0 \qquad [8.22]$$

$$\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1}+\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae2}+\mathbf{I}_{ae0} = 0 \qquad [8.23]$$

وبطرح [8.23] من [8.22] نحصل على

$$(\mathrm{h}^2-\mathrm{h})\mathbf{I}_{ae1}+(\mathrm{h}-\mathrm{h}^2)\mathbf{I}_{ae2} = 0$$

$$\mathbf{I}_{ae1} = \mathbf{I}_{ae2}.$$

وبتعويض هذه النتيجة في [8.23]

$$(\mathrm{h}+\mathrm{h}^2)\mathbf{I}_{ae1}+\mathbf{I}_{ae0} = 0$$

وبما أن $\mathrm{h}+\mathrm{h}^2 = -1$ فأن

$$\mathbf{I}_{ae1} = \mathbf{I}_{ae0}$$

وبذلك

$$\mathbf{I}_{ae1} = \mathbf{I}_{ae2} = \mathbf{I}_{ae0} = \mathbf{I}_{ae}/3. \qquad [8.24]$$

المعادلة [8.24] تبين أنه لهذا العطل المحدد ستكون تيارات التتابع الثلاثة في طور a كلها متساوية بالضبط في المقدار ومتطابقة في الطور.

وبأعادة ترتيب الحدود في [8.21] نحصل على

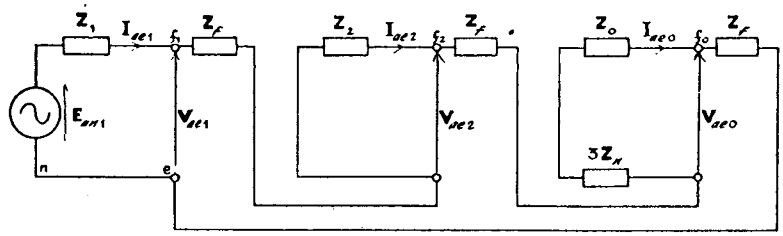
ترابط شبكات التتابع الضروري لتحقيق المعادلتين [8.24] و [8.25] مبين في شكل 8.10 حيث أن

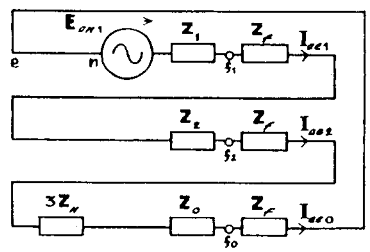
$$(\mathbf{V}_{ae1}-\mathbf{Z}_f\mathbf{I}_{ae1})+(\mathbf{V}_{ae2}-\mathbf{Z}_f\mathbf{I}_{ae2})+(\mathbf{V}_{ae0}-\mathbf{Z}_f\mathbf{I}_{ae0}) = 0. \qquad [8.25]$$

$$\mathbf{I}_{ae1} = \mathbf{I}_{ae2} = \mathbf{I}_{ae0} = \frac{\mathbf{E}_{an}}{\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_0+3\mathbf{Z}_n+3\mathbf{Z}_f} \qquad [8.26]$$

وتيار العطل يكون

$$\mathbf{I}_{ae} = \frac{3\mathbf{E}_{an}}{\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}_0+3\mathbf{Z}_n+3\mathbf{Z}_f} \qquad [8.27]$$





شكل 8.10 ترابط شبكات التتابع لعطل ارضي على الطور المرجع a

اذا كانت نقاط التفرع النجمي للمنظومة مؤرضة مباشرة فأن $\mathbf{Z}_n = 0$ واذا كان العطـــل دائرة قصيرة (أي أنه ذو ممانعة مهملة) فعندئذ $\mathbf{Z}_f = 0$ وشكل 8.10 يتقلص الــى توصيل متوال بسيط لشبكات التتابع الثلاث ذي تيار عطل معطى بالمعادلة

$$\mathbf{I}_{ae} = \frac{3\mathbf{E}_{an}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0} \qquad [8.28]$$

الفولتيات الى الأرضي للطورين السليمين b و c عند نقطة العطل يمكن ان توجد مــن [8.16] و [8.17] .

مثـــال محلـــول 8.4 .

منوب ثلاثي الطور . 33 كيلوفولت . 37·5 ميكافولت أمبير مربوط الى خط علوي معلق 33 كيلوفولت وتعرض هذا الخط الى عطل أرضي على أحد الموصلات عند الطرف البعيد . مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري للمنوب هي 18 و12 و 10 % (علــى المقنن) ومفاعلات الخط هي 6·3 و 6·3 و 12·6 أوم موصل . أحسب تيار العطل وفولتيات الطور عند أطراف المنوب . أفرض أن نقطة التفرع النجمي للمنوب مؤرضـــة مباشرة .

الحــــل

الأساس 37·5 MVA (ثلاثة أطوار) · 33-kV (خط)

الفولتية الأساس = $1\ p.u. = 33/\sqrt{3} = 19{\cdot}1$ كيلو فو لت / طور

التيار الأساس = $1\ p.u. = 37{\cdot}5/(\sqrt{3}\times 33) = 0{\cdot}655$ كيلو امبير

المفاعلة الأساس = $1\ p.u. = 19{\cdot}1/0{\cdot}655 = 29{\cdot}1$ أوم .

لذلك $6{\cdot}3\ ohms = 6{\cdot}3/29{\cdot}1 = 0{\cdot}2165\ p.u.$

المفاعلة الكلية للشبكة المكافئة لشبكات التتابع الثلاث على التوالي (شكل 8.10) تكون

$$X_t = j\,[(0{\cdot}18+0{\cdot}2165)+(0{\cdot}12+0{\cdot}2165)+(0{\cdot}1+0{\cdot}433)]$$
$$= j\,1{\cdot}266\ p.u.$$
$$\mathbf{I}_{ae1} = 1\underline{/0^\circ}/j\,1{\cdot}266 = -j\,0{\cdot}791\ p.u.$$

وتيار العطل يكون $\mathbf{I}_{ae} = -j\,0{\cdot}791\times 3\times 0{\cdot}655 = -j\,1{\cdot}555\ kA$

الفولتيات نسبة الى الأرض عند طرفي المنوب تحسب باستعمال [8.12] و [8.13] و [8.14] حيث أن المفاعلات هي تلك المحسوبة من المصدر الى طرفي المنوب .

$$\mathbf{V}_{ae1} = 1\underline{/0^\circ}-(-j\,0{\cdot}791)(+j\,0{\cdot}18) = 0{\cdot}858+j\,0\ p.u.$$
$$\mathbf{V}_{ae2} = -(-j\,0{\cdot}791)(+j\,0{\cdot}12) = -0{\cdot}0948+j\,0\ p.u.$$
$$\mathbf{V}_{ae0} = -(-j\,0{\cdot}791)(+j\,0{\cdot}1) = -0{\cdot}0791+j\,0\ p.u.$$
$$\mathbf{V}_{ae} = \mathbf{V}_{ae1}+\mathbf{V}_{ae2}+\mathbf{V}_{ae0} = 0{\cdot}6841\underline{/0^\circ}\ p.u.$$
$$= 0{\cdot}6841\times 19{\cdot}1\underline{/0^\circ} = 13\underline{/0^\circ}\ kV$$
$$\mathbf{V}_{be} = h^2\mathbf{V}_{ae1}+h\mathbf{V}_{ae2}+\mathbf{V}_{ae0} = 0{\cdot}945\underline{/-119{\cdot}16^\circ}\ p.u.$$
$$= 18\underline{/-119{\cdot}16^\circ}\ kV$$
$$\mathbf{V}_{ce} = 18\underline{/+119{\cdot}16^\circ}\ kV.$$

ميكا فولت أمبير العطل= $19{\cdot}1\times 1{\cdot}555 = 29{\cdot}6$ ميكا فولت أمبير.

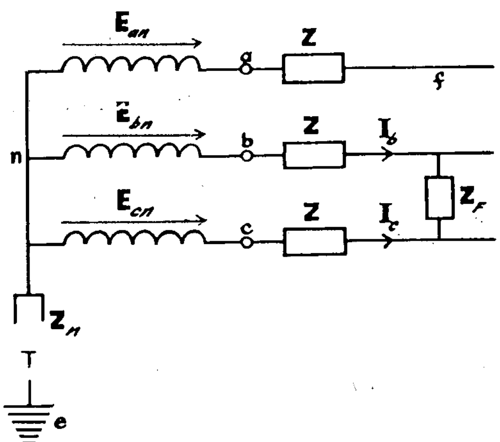
على الطالب أن يتمعن في أن النتيجة الأخيرة يمكن الحصول عليها من [8.6] أي أن $(VA)_f = 1/X\ p.u.$ على شرط أن X تؤخذ على أنها X_t وهي المفاعلة الكليــــة لشبكة العطل المكافئة .

من الناحية العملية تؤرض المنويات عادة خلال مقاومة ذات قيمة حوالي100 %
محسوبة على تقنين المنوب . القيمة المناظرة التي يجب ان تضاف الى X_t تكون300 %
$= 3$ p.u .وبذلك تصبح الممانعة الكلية لشبكة العطل المكافئة $3+j\,1{\cdot}266$ p.u.

8.4.2 خط الى خط (عطل طوري) عبر الخطين b و c

LINE-TO-LINE (PHASE-FAULT) ACROSS LINES b AND c

شكل 8.11 يبين منظومة العطل . يجب ان نلاحظ ان الاتجاه الموجب المألوف لسريان التيار اخذ وكانه يبتعد من المصدر . لاتوجد فولتية عبر Z_n والتيار I_{a0} يكون صفرا لانه لايوجد طريق للتيار يتمكن من خلاله ان يجري الى نقطة التفرع النجمي للمصدر عن طريق الأرض .



شكل 8.11 عطل خط الى خط عبر b ، c.

وبفحص الشكل 8.11 يمكننا ان نكتب

$$I_a = 0,\ I_b = -I_c \quad \text{and} \quad V_{be} - Z_F I_b = V_{ce}.$$

على الطالب ان يبين انه بواسطة تحويل التيارات والفولتيات في هذه المعادلات الثلاث الى مركباتها المتماثلة وحل هذه المعادلات سنحصل على النتائج التالية

$$\mathbf{I}_{a1} = -\mathbf{I}_{a2} \qquad [8.29]$$
$$\mathbf{V}_{ae1} - \mathbf{V}_{ae2} = \mathbf{Z}_F \mathbf{I}_{a1}. \qquad [8.30]$$

يمكننا ان نحقق المعادلتين [8.29] و [8.30] عن طريق الربط المتداخل لشبكات التتابع المبينة في شكل 8.12 . من [8.29] و [8.30] اوبوساطة فحص شكل 8.12 يمكننا ان نحصل على

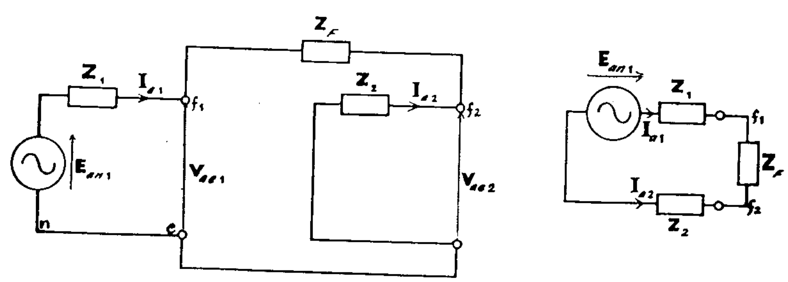
$$\mathbf{I}_{a1} = \frac{\mathbf{E}_{an}}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_F} \qquad [8.31]$$

ومن المعادلة [8.9] يمكننا بسهولة ان نبين (قد يرغب الطالب تحقيق ذلك بنفسه) ان تيار العطل يمكن ان يعطى بالمعادلة

$$\mathbf{I}_b = -j\sqrt{3}\,\mathbf{I}_{a1} = -\mathbf{I}_c \qquad [8.32]$$

مثال محلول 8.5

باستعمال بيانات المثال 8.4 ولكن مع دائرة قصيرة بين الخطين b و c عند النقطة f بدلا من العطل السابق . احسب تيار العطل والفولتية الى الارض للخط السليم عند نقطة العطل .



شكل 8.12 ترابط شبكات التتابع لعطل طوري

الحــــل

المفاعلة الكلية لشبكة العطل المكافئة . من شكل 8.12 . تكون

$$X_t = j[(0{\cdot}18+0{\cdot}2165)+(0{\cdot}12+0{\cdot}2165)]$$
$$= j\,0{\cdot}733 \text{ p.u.}$$
$$\mathbf{I}_{a1} = 1/0°/j\,0{\cdot}733 = -j\,1{\cdot}365 \text{ p.u.}$$

وتيار العطل يكون

$$\mathbf{I}_b = -j\sqrt{3}\times\mathbf{I}_{a1} = -j\sqrt{3}(-j\,1{\cdot}365) = -2{\cdot}36 \text{ p.u.}$$
$$= 2{\cdot}36\times0{\cdot}655\underline{/180°} = 1{\cdot}545\underline{/180°}\text{ kA.}$$

وعند نقطة العطل

$$\mathbf{V}_{ae1} = (1+j\,0)-(-j\,1{\cdot}365)(+j\,0{\cdot}3965)$$
$$= 0{\cdot}459+j\,0 \text{ p.u.}$$

على الطالب ان يثبت ان

$$\mathbf{V}_{ae2} = 0-(+j\,1{\cdot}365)(+j\,0{\cdot}3365)$$
$$= \mathbf{V}_{ae1} \text{ (since } \mathbf{Z}_f = 0).$$

ولـذلك

$$\mathbf{V}_{ae} = \mathbf{V}_{ae1}+\mathbf{V}_{ae2} = 0{\cdot}918\underline{/0°} \text{ p.u.}$$
$$= 17{\cdot}5\underline{/0°} \text{ kV.}$$

وميكا فولت امبير العطل = $33\times1{\cdot}545 = 51$ ميكا فولت امبير

على الطالب ان يتأكد من ان النتيجة الأخيرة يمكن ان يحصل عليها من [8.6] على ان ان تؤخذ X على انها المفاعلة الكلية X_t لدائرة العطل المكافئة .

8.4.3 دائرة قصيرة خط الى خط الى الأرض (عطل أرضي مزدوج) على الطورين b و c

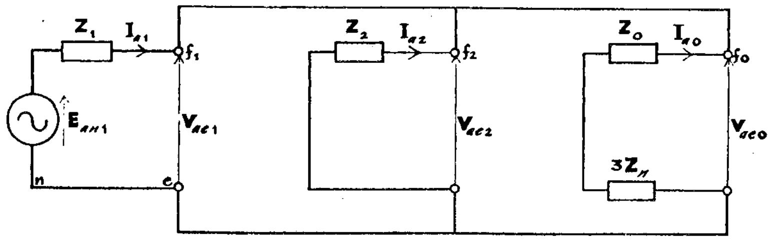
LINE TO LINE TO EARTH SHORT CIRCUIT (DOUBLE EARTH FAULT) ON PHAES B AND C

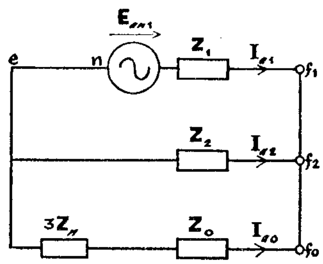
قبل ان نتقدم الى الحالة العامة لعطل ارضي مزدوج في الفقرة 8.4.4 سنوجز في هذه الفقرة الحالة الابسط لدائرة قصيرة مباشرة الى الارضي على الطورين b و c

فحص الدائرة لهذا العطل يعطينا

$$\mathbf{I}_a = 0,\ \mathbf{V}_{be} = 0 \quad \mathbf{V}_{ce} = 0$$

بتحويل هذه المعادلات الثلاث الى مركباتها المتماثلة نحصل على (كما يجب أن يتأكد الطالب من ذلك بنفسه).





شكل 8.13 ترابط شبكات التتابع لدائرة قصيرة خط الى خط الى ارضي على b و c

$$\mathbf{I}_{a1}+\mathbf{I}_{a2}+\mathbf{I}_{a0} = 0 \qquad [8.33]$$

و

$$\mathbf{V}_{ae1} = \mathbf{V}_{ae2} = \mathbf{V}_{ae0}. \qquad [8.34]$$

يمكننا أن تحقق المعادلتين [8.33] و [8.34] من دائرة الشكل 8.13 ومنها يمكن أن نرى أن

$$\left.\begin{aligned} \mathbf{I}_{a1} &= \frac{\mathbf{E}_{an}}{\mathbf{Z}_1+\mathbf{Z}_2\mathbf{Z}'_0/(\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}'_0)} \\ \mathbf{I}_{a2} &= -\mathbf{I}_{a1}\cdot\frac{\mathbf{Z}'_0}{\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}'_0} \\ \mathbf{I}_{a0} &= -\mathbf{I}_{a1}\cdot\frac{\mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_2+\mathbf{Z}'_0} \end{aligned}\right\} \qquad [8.35]$$

من المعادلة [8.14] يمكننا أن نلاحظ أنه اذا كانت نقاط التفرع النجمي للمنظومـــة مؤرضة مباشرة (أي أن $\mathbf{Z}_n = 0$) فعندئذ $\mathbf{Z}'_0$ تصبح $\mathbf{Z}_0$ والتي تمثل ممانعــة التتابع الصفري المؤثرة المفردة المناظرة الى كل الأجهزة المربوطة بين التوليد والعطل . يمكننا أن نحصل على تياري الخطين العاطلين من [8.35] و [8.9] . وتيار العطل في المسار الارضي يكون $\mathbf{I}_b+\mathbf{I}_c = 3\mathbf{I}_{a0}$

8.4.4 الحالة العامة لعطل ارضي مزدوج على الطورين b و c

GENERAL CASE OF DOUBLE-EARTH-FAULT ON PHASES b AND c

الحالة العامة لعطل أرضي مزدوج والذي يكون متماثلاً نسبة الى الطور المرجع a هي عطل يحدث بين الطورين b و c مع نقطة المنتصف لممانعة العطل $2Z_f$ بين الطورين مربوطة الى الارض عن طريق ممانعة Z_g . لقد لاحظنا الان أن طريقة المركبات المتماثلة يمكن تبسيطها الى حد كبير اذا طبقت على اعطال متماثلة نسبة الى الطور المرجع a مرة أخرى يجب أن تكون المنظومة متوازنة من التوليد الى نقطة العطل .

الطريقة التي استعملت هنا تتبع الطريقة التي استعملت في الفقرة 8.4.1 بالضبط . المعادلات الثلاث التي يمكن أن تكتب للفولتيات والتيارات الفعلية عند نقطة العطل هي

$$\mathbf{I}_{ae} = 0 \qquad [8.36]$$

$$\mathbf{V}_{be} = (\mathbf{Z}_f + \mathbf{Z}_g)\mathbf{I}_{be} + \mathbf{Z}_g\mathbf{I}_{ce} \qquad [8.37]$$

$$\mathbf{V}_{ce} = \mathbf{Z}_g\mathbf{I}_{be} + (\mathbf{Z}_f + \mathbf{Z}_g)\mathbf{I}_{ce}. \qquad [8.38]$$

وبكتابه هذه التيارات وفروق الجهد بين موصلات الخط والأرضي عند نقطة العطل على أنه حاصل جمع مركباتها المتماثلة نحصل على

$$\mathbf{I}_{ae1} + \mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0} = 0 \qquad [8.39]$$

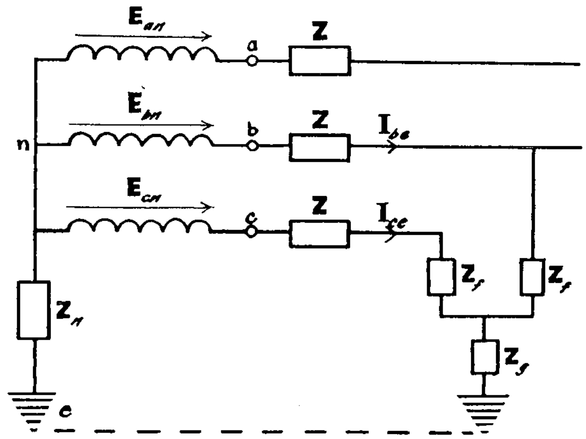
$$\mathrm{h}^2\mathbf{V}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = (\mathbf{Z}_f + \mathbf{Z}_g)(\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}) + \mathbf{Z}_g(\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}) \qquad [8.40]$$

$$\mathrm{h}\mathbf{V}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{V}_{ae2} + \mathbf{V}_{ae0} = \mathbf{Z}_g(\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}) + (\mathbf{Z}_f + \mathbf{Z}_g)(\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}). \qquad [8.41]$$

وبطرح [8.41] من [8.40] نحصل على

$$(\mathrm{h}^2 - \mathrm{h})\mathbf{V}_{ae1} + (\mathrm{h} - \mathrm{h}^2)\mathbf{V}_{ae2} = \mathbf{Z}_f(\mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}) - \mathbf{Z}_f(\mathrm{h}\mathbf{I}_{ae1} + \mathrm{h}^2\mathbf{I}_{ae2} + \mathbf{I}_{ae0}).$$

وبتجميع حدود التتابع الموجب سوية الى الجانب الايسر وحدود التتابع السالب الى جهة اليمين تصبح النتيجة



شكل 8.14 عطل ارضي مزدوج عام على الطورين b و c

$$(h^2-h)(V_{ae1}-Z_fI_{ae1}) = (h^2-h)(V_{ae2}-Z_fI_{ae2})$$
$$V_{ae1}-Z_fI_{ae1} = V_{ae2}-Z_fI_{ae2}$$

بتعويض هذه النتيجة في المعادلة [8.41] تعطينا

$$h(V_{ae1}-Z_fI_{ae1})+h^2(V_{ae1}-Z_fI_{ae1})+(V_{ae0}-Z_fI_{ae0}) = Z_g[(h^2+h)I_{ae1}+(h^2+h)I_{ae2}+2I_{ae0}]$$

والمعادلة الاخيرة يمكن تبسيطها الى

$$V_{ae1}-Z_fI_{ae1} = V_{ae0}-Z_fI_{ae0}-Z_g(-I_{ae1}-I_{ae2}+2I_{ae0}).$$

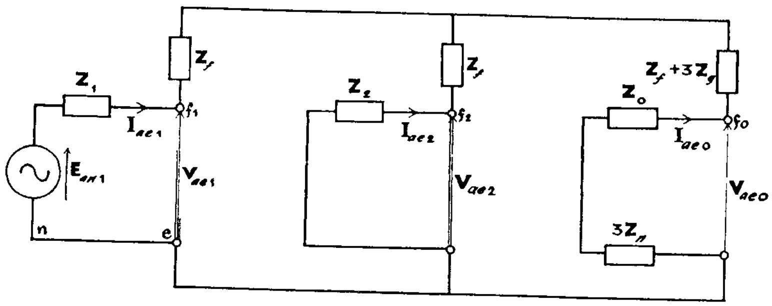
من المعادلة [8.39] $(-I_{ae1}-I_{ae2}) = I_{ae0}$ و

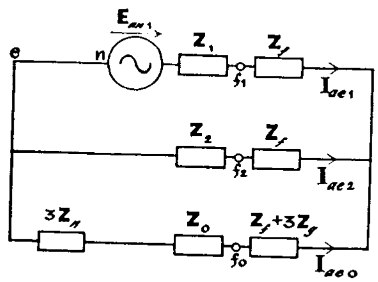
ولذلك

$$V_{ae1}-Z_fI_{ae1} = V_{ae2}-Z_fI_{ae2} = V_{ae0}-(Z_f+3Z_g)I_{ae0}. \quad [8.42]$$

المعادلتان [8.39] و [8.42] يمكن تحقيقهما عن طريق الربط المتداخل لشبكات التتابع المبينة في شكل 8.15

من هذا العطل المتوازي العام يمكننا ان نحصل على نتائج عدد من الاعطال الاقل تعقيدا والتي يكثر احتمال حدوثها في الواقع ويشمل ذلك تلك الاعطال التي اوجزت في الفقرة 8.4.2 $(Z_F = 2Z_f$ و $Z_g = \infty)$ والفقرة 8.4.3 $(Z_g = 0$ و $Z_f = 0)$





شكل 8.15 ترابط شبكات التتابع لعطل
ارضي مزدوج عام على b و c

8.4.5 عطل ارضي ثلاثي الطور غير متوازن عام

GENERAL UNBALANCED THREE-PHASE-EARTH FAULT

شكل 8.16 يبين عطلا ارضيا على كل الاطوار الثلاثة والذي يكون متماثلا نسبة الى الطــور المرجع a مرة اخرة . المعادلات التي يمكن كتابتها من تفحص الدائرة هي

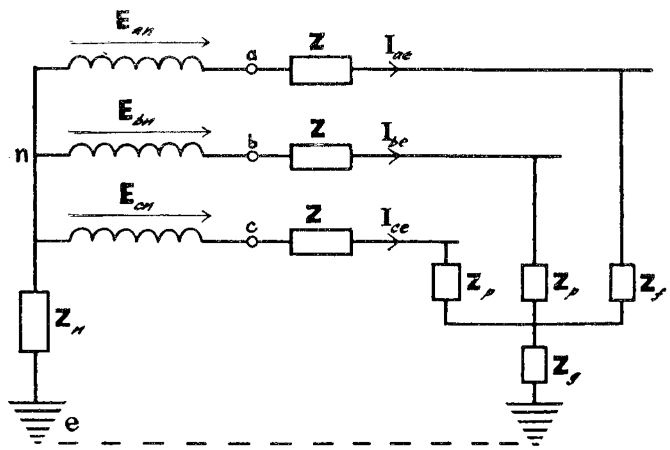
$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{ae} &= \mathbf{Z}_f\mathbf{I}_{ae}+\mathbf{Z}_g(\mathbf{I}_{ae}+\mathbf{I}_{be}+\mathbf{I}_{ce}) \\ \mathbf{V}_{be} &= \mathbf{Z}_p\mathbf{I}_{be}+\mathbf{Z}_g(\mathbf{I}_{ae}+\mathbf{I}_{be}+\mathbf{I}_{ce}) \\ \mathbf{V}_{ce} &= \mathbf{Z}_p\mathbf{I}_{ce}+\mathbf{Z}_g(\mathbf{I}_{ae}+\mathbf{I}_{be}+\mathbf{I}_{ce}). \end{aligned}$$

بعد تحويل المعادلات اعلاه الى مركباتها المتماثلة فعلى الطالب ان يستنتج . للتمرين . مايلي

$$\mathbf{V}_{ae1}-\mathbf{Z}_p\mathbf{I}_{ae1} = \mathbf{V}_{ae2}-\mathbf{Z}_p\mathbf{I}_{ae2} = \mathbf{V}_{ae0}-(\mathbf{Z}_p+3\mathbf{Z}_g)\mathbf{I}_{ae0} \qquad [8.43]$$

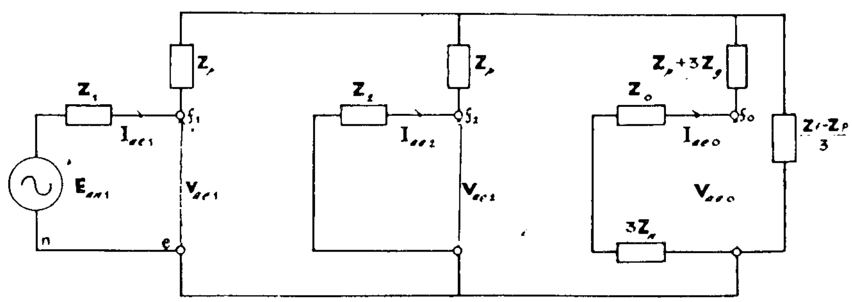
and

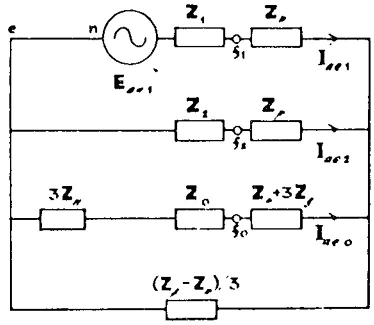
$$\mathbf{V}_{ae1}-\mathbf{Z}_p\mathbf{I}_{ae1} = (1/3)(\mathbf{Z}_f-\mathbf{Z}_p)(\mathbf{I}_{ae1}+\mathbf{I}_{ae2}+\mathbf{I}_{ae0}). \qquad [8.44]$$



شكل 8.16. عطل ارضي ثلاثي الطور غير متوازن

المعادلتان [8.43] و [8.44] يمكن تحقيقهما بالربط المتداخل لشبكات التتابع في شكل 8.17 والتي منها يمكن ان نستنتج ظروف الفقرات 8.4.2 و 8.4.3 و 8.4.4 ولكن ليس 8.4.1 .

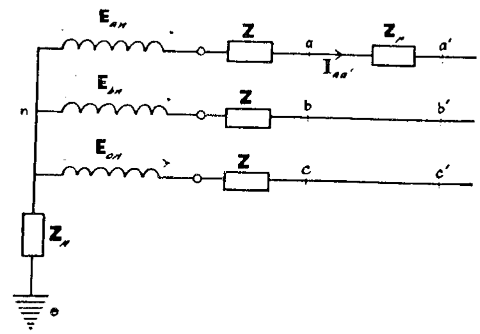




شكل 8.17 ترابط شبكات التتابع لعطل ارضي ثلاثي الطور غير متوازن

8.4.6 عطل توالٍ على طور a SERIES FAULT ON PHASE a

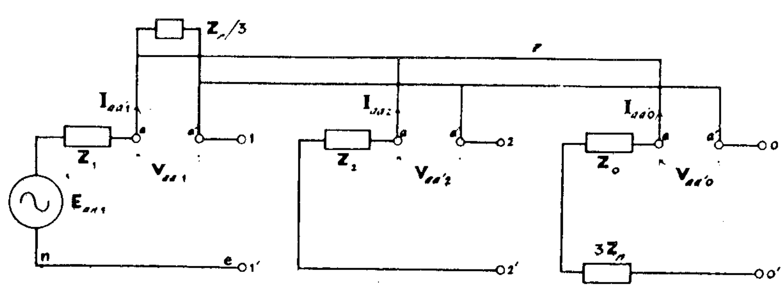
اذا حدث قطع في موصل احد الاطوار مع حدوث شرارة عبر هذا القطع فان هذا يكافيء ظهور ممانعة Z_r على التوالي مع هذا الطور مع بقاء الطورين الاخرين بدون مثل



شكل 8.18 عطل توال على طور a

هذه الممانعة وكما مبين في شكل 8.18 . بتفحص الدائرة يمكننا كتابة المعادلات الخاصة بهذا الظرف وكما يلي

$$V_{aa'} = Z_r I_{aa'} \quad [8.45]$$
$$V_{bb'} = 0 \quad [8.46]$$
$$V_{cc'} = 0. \quad [8.47]$$



شكل 8.19 ترابط شبكات التتابع لعطل توالٍ في الطور a

وبتحويل المعادلات اعلاه الى مركباتها المتماثلة نحصل على

$$\mathbf{V}_{aa'1}+\mathbf{V}_{aa'2}+\mathbf{V}_{aa'0} = \mathbf{Z}_r(\mathbf{I}_{aa'1}+\mathbf{I}_{aa'2}+\mathbf{I}_{aa'0}) \quad [8.48]$$
$$h^2\mathbf{V}_{aa'1}+h\mathbf{V}_{aa'2}+\mathbf{V}_{aa'0} = 0 \quad [8.49]$$
$$h\mathbf{V}_{aa'1}+h^2\mathbf{V}_{aa'2}+\mathbf{V}_{aa'0} = 0. \quad [8.50]$$

المعادلتان *[8.49]* و *[8.50]* تعطينا $\mathbf{V}_{aa'2} = \mathbf{V}_{aa'1}$ وبتعويض هذه النتيجة في احدى هاتين المعادلتين نحصل على

$$\mathbf{V}_{aa'1} = \mathbf{V}_{aa'2} = \mathbf{V}_{aa'0}. \quad [8.51]$$

تعويض المعادلة *[8.51]* في المعادلة *[8.48]* يعطينا

$$\mathbf{V}_{aa'1} = (\mathbf{Z}_r/3)(\mathbf{I}_{aa'1}+\mathbf{I}_{aa'2}+\mathbf{I}_{aa'0}). \quad [8.52]$$

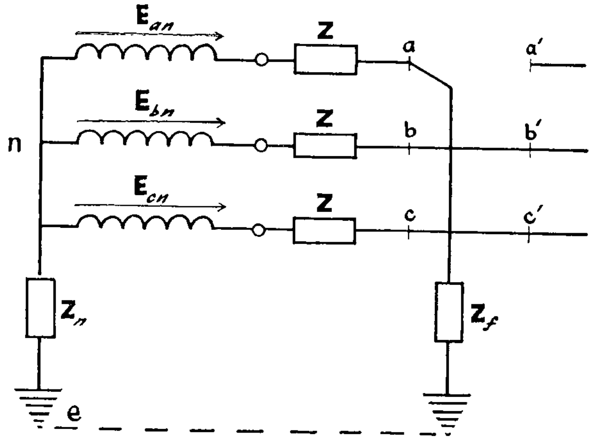
المعادلتان *[8.51]* *[8.52]* يمكن تحقيقها بالربط المتداخل لشبكات التتابع كما في شكل 8.19 . يجب ان نلاحظ ان بين الاطراف 1 و ′1 ، 2 ، ′2 0 ، ′0 تم ربط ممانعات تتابع الطور (خط الى محايد) الموجبة والسالبة والصفرية بالتتابع للدائرة التي على يمين الأطراف a'وb'وc' في شكل 8.18 (انظر الجزة 2) . اذا تم أخماد شرارة الموصل المقطوع فان Z_r في الشكلين 8.18 و 8.19 = ∞ .

8.4.7 اعطال توالٍ وتوازٍ في ان واحد على طور a

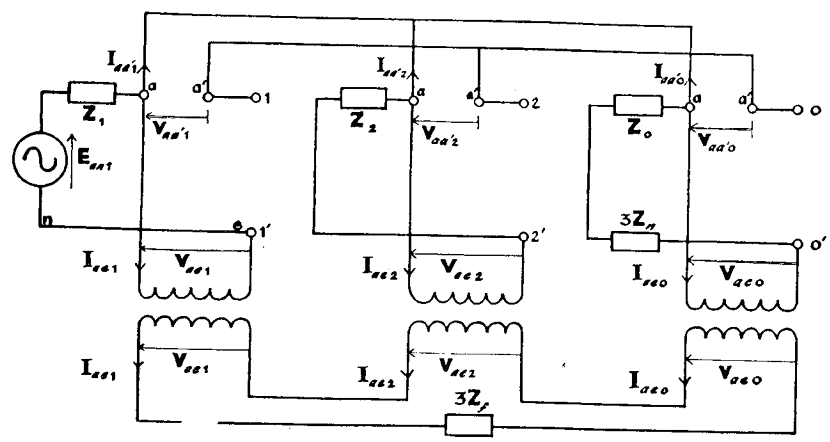
SIMULTANEOUS SHUNT AND SERIES FAULTS ON PHASE *a*

اذا انقطع موصل الطور a فمن المحتمل ان يمس الطرف الذي من جهة المصدر الارضي مع ممانعة الى الارض مقدارها Z_f وكما مبين في شكل 8.20 . لهذا الظرف

تطبق المعادلات *[8.24]* و *[8.25]* و *[8.51]* و *[8.52]*. لكي نربط دائرة مكافئة لشبكات التتابع الثلاث والتي ستحقق كل المعادلات الاربعة المذكورة فمن الضروري اضافة محولات عزل 1 : 1 مثالية كما مبين في شكل 8.21 . مرة اخرى . أي منظومة قدرة مربوطة الى يمين $a'b'c'$ تكون مربوطة الى يمين ′11 و ′22 و ′00 . فمثلا اذا كانت المنظومة التي على اليمين تحتوي على توليد مباشر فان شبكات التتابع الموجبة والسالبة والصفرية الخاصة بها يجب أن تربط عبر ′11 و ′22 و ′00 على التوالي .



شكل 8.20 موصل طور مقطوع ومؤرض



شكل 8.21 ترابط شبكات التتابع لموصل طور مقطوع ومؤرض

8.4.8 فولت أمبير العطل FAULT VOLT-AMPERES

يدعى فولت أمبير العطل عادة بمستوى العطل ويعطى بالـ .MVA وهو حاصل ضرب تيار العطل مع الفولتية المقنعة للمنظومة (وليست الفولتية عند نقطة العطل) . في حالة عطل ارضي فان الفولتية المستعملة هي فولتية خط الى محايد (أو الطور) بينما لعطل طوري تكون الفولتية المستعملة هي فولتية خط الى خط . تهمل زوايا الطور في هذا المضمار وتؤخذ بنظر الاعتبار القيم اللامتجهة فقط .

سنبين الآن كيف أن مستويات العطل بالفولت أمبير يمكن أن نحصل عليها مباشرة من الشبكات المكافئة للعطل اذا استعملنا نظام نسبة الوحدة . افرض أن $\mathbf{Z}_t$ تمثل الشبكة المكافئة للعطل وبذلك فلعطل أرضي (شكل 8.10)

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_0 + 3\mathbf{Z}_n + 3\mathbf{Z}_f$$

ولعطل طوري (شكل 8.12)

$$\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + \mathbf{Z}_F.$$

افرض أن V_r تمثل فولتية الطور المقننة لذلك الجزء من المنظومة التي حدث العطل عليها . فعندئذ اذا أخذنا القيم المقننة قيم أساس فان الفولت أمبير الأساس الثلاثي الثلاثي الطور يكون

$$3V_rI_r = 3V_r^2/Z_r.$$

ولعطل أرضي . المعادلة [8.28] تبين أن

$$(\text{fault VA}) = 3V_r \,.\, E_{an}/Z_t$$

وفي نسبة الوحدة .

$$(\text{fault VA})_{pu} = \frac{3V_rE_{an}}{(3V_r^2/Z_r)Z_t} = \frac{E_{an}/V_r}{Z_t/Z_r} = \frac{(E_{an})_{pu}}{(Z_t)_{pu}}. \qquad [8.53]$$

وبالتشابه فانه لعطل طوري . تبين المعادلتان [8.31] [8.32] أن

$$(\text{fault VA}) = \sqrt{3}\ V_r \,.\, \sqrt{3}\ E_{an}/Z_t$$

$$(\text{fault VA})_{pu} = \frac{3V_rE_{an}}{(3V_r^2/Z_r)Z_t} = \frac{E_{an}/V_r}{Z_t/Z_r} = \frac{(E_{an})_{pu}}{(Z_t)_{pu}}. \qquad [8.54]$$

اذا عددنا الـ ق. د. ك خلف العطل مساوية للفولتية المقننة (والتي هي ليست بعيدة كثيـــراً عــن الحقيقــة بالنسبــة للـــدورات القليلـــة الأولـــى بعــد حــدوث العطل . فعنــدئــذ كمــا فــي العطــل الثلاثـــي الطور المتماثــل (الفقرة) تتبســـط المعادلتان [8.53] و [8.54] الى $1/(Z_t)_{pu}$. فولت أمبير العطل هذا يمكن التعبير عنه نسبة الى قيمة الفولت أمبير الأساس الثلاثي الطور : هذا منطقي لأنه من المعتاد أن نعطي الفولت أمبير الأساس بوصفه قيمة ثلاثية الطور .

8.4.9 مقارنة بين مستويات العطل COMPARISON OF FAULT LEVELS

سنقارن الآن بين المقادير النسبية لتيارات العطل وفولت أمبير العطل آخذين العطل الثلاثي الطور عطلاً قياساً للمقارنة (1·0 p.u.) . وسنفترض للسهولة ان مقاومة المنظومة مهملة وأن $X_1 = X_2$. أي أنه ستؤخذ المفاعلة دون العابرة لـ X_1 بالنسبة للمنوبات (انظر الفقرة 7.5) . سنفترض كذلك أن مفاعلة العطل تكون مهملة بما أن النقطة الأساسية للتمرين هي أن نبين أن عطلاً أرضياً قرب نقطة محايد مصدر مؤرض مباشرة يمكن أن يزيد على ذلك لعطل ثلاثي الطور لذلك سنفترض أن المنظومة مؤرضة مباشرة .

(أ) عطل ثلاثي الطور

تيار العطل = E_{an}/X_1

فولت أمبير VA العطل = $3V_rE_{an}/X_1$

(ب) عطل أرضي

تيار العطل = $3E_{an}/(X_1 + X_2 + X_0)$

ويمكن أن يعبر عنها بدلالة نسبة الوحدة من قيمة عطل ثلاثي الطور

تيار العطل = $3X_1/(2X_1 + X_0)$ بنسبة الوحدة

اذا كانت $X_0 = X_1$ فأن تيار عطل أرضي = 1·0 بنسبة الوحدة

اذا كانت $X_0 < X_1$ فأن تيار عطل أرضي > 1·0 بنسبة الوحدة

$$\text{Fault VA} = 3V_rE_{an}/(X_1 + X_2 + X_0),$$

ومرة أخرى بنسبة الوحدة من قيمة عطل ثلاثي الطور فتكون

$$\text{fault VA} = X_1/(2X_1 + X_0)\ \text{p.u.}$$

هذا العطل سيزال من على قطب واحد من قاطع دورة ثلاثي الطور له ثلاثة أقطاب متماثلة . وهكذا فأن VA القطع الثلاثي الطور المقنن لقاطع الدورة سيكون

$$3X_1/(2X_1 + X_0)\ \text{p.u.}$$

وبذلك فالأستنتاجات تكون كما هي لتيار عطل أرضي وبالتحديد . اذا كانت $X_0 = X_1$ فأن قاطع الدورة نفسه سيفصل عطل ثلاثي الطور اوعطلا أرضيا ولكن اذا كانت $X_0 < X_1$ فان العطل الأرضي يحتاج الى قاطع دورة ذي قيمة مقننة أكبر . بما أن شبكة التتابع الصفري تمتد فقط من نقطة العطل رجوعا الى أقرب محول ملفه الأبتدائي يكون نجميا

غير مؤرض او مربوطا مثلثيا بينما شبكة التتابع الموجب تمتد رجوعا الى منّوبات المصــدر فغالبا مايحدث بأن $X_0 < X_1$

ج) دائرة قصيرة خط الى خط (عطل طوري)

تيار العطل $= \sqrt{3}\, E_{an}/2X_1$

$= \sqrt{3}/2 = 0{\cdot}867$ بنسبة الوحدة

VA العطل $= \sqrt{3}\,.\, \sqrt{3}\, V_r E_{an}/2X_1$

$= 0{\cdot}5$ بنسبة الوحدة

وبما أن هذا العطل قد ازيل عن قطبين من قاطع الدورة فأن المقنن الثلاثي الطور المناظر لقاطع الدورة يكون

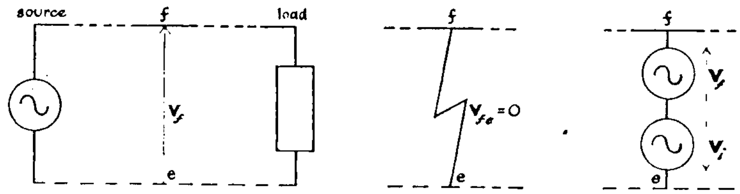
$$(3/2)0{\cdot}5 = 0{\cdot}75 \text{ p u.}$$

هذا المثال البسيط يوضح لنا لماذا يكون العطل الطوري غير مهم نسبياً (في هذا المضمار)

8.4.10 عطل غير متماثل عند ما تكون المنظومة محملة

ASYMMETRICAL FAULT WHILST SYSTEM IS ON LOAD

ان أغلب حسابات العطل الأبتدائية تفترض أن الخطأ يحدث عندما تكون المنظومة غير محملة مع منّوبات مثارة الى الفولتية المقننة للمنظومة . من ناحية ثانية فاذا كانـــت المنظومة في حالة حمل عند حدوث العطل عند نقطة f في شكل 8.22 فأنه يمكـــن ايجاد تيار العطل باستعمال نظرية ثفنن (Helmholtz) . التيار في مسار العطل يمكن ايجاده بفتح دائرة مسار العطل وتقسيم فولتية الخط الى محايد عبر الدائرة المفتوحـــة (ستكون هذه V_f والتي هي فولتيةح. م. ت. عند نقطة العطل قبل حدوث العطـــل مباشرة) على ممانعة الشبكة الهامدة التي يمكن أن نحصل عليها بالنظر الى الدائرة المفتوحة (هذا سيشمل ممانعة مسار العطل). وستستعمل مفاعلة المنوب الملائمة . دون العابرة أو العابرة . ولقد كان العطل الثلاثـي الطور المتماثل الذي تمت دراسته في الفقرة 7.5 والمثال 7.3 مثالاً لمثل هذه الحسابات . قطبية V_i التي تنشيء تيار العطل يجب أن تلاحظ بدقة الفولتية V_i تضاف الى فولتية ما قبل العطل V_f لـكي نقلل الفولتية الـكلية عند العطل الى صفر . وبذلك فالأتجاه التقليدي لتيار العطل هو من خلال مسار العطل f الى e . اذا أفترضنا أن المنظومة كانت متوازية قبل حدوث العطل فـأن V_f ستكون فولتية التتابع الموجب فقط .



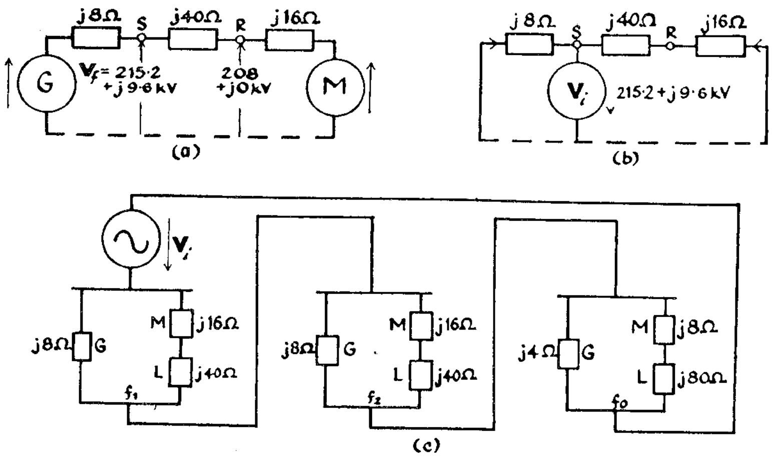
(أ) قبل العطل (ب) عند العطل (جـ) فولتية محقونة $V_f=V_f$

شكل 8.22 تطبيق نظرية ثفنن عند نقطة العطل .

تيارات العطل يمكن حسابها بأستعمال المعادلات الملائمة لنوع العطل ممثلا المعادلتان [8.26] و [8.27] تستعملان لعطل ارضي على الطور a والمعادلتان [8.31] و [8.32] تستعملان لعطل طوري .. الخ مع أستعمال V_f بدلا عن E_{an} . وقد نتج هذا لأن نظرية ثفنن تبين أنه لعطل ما على دائرة خطية ذات حمل متوازن تطبق كل ترابطات شبكات التتابع (الأشكال 8.10 و 8.15 ... الخ) على نوع العطل الخاص بها عندما يستعاض عن E_{an} بـ V_f بوصفها فولتية دافعة للتتابع الموجب. التيارات الناتجة الداخلة الى العطل نفسه ومن خلال المنظومة المجهزة له يمكن أن تضاف بالتراكب الى تيارات الحمل الأصلية لكي نحصل على تيارات المنظومة الفعلية أثناء فترة العطل (دون العابرة او العابرة) تحت الدراسة .

مثـــال محلـــول 8.6

في شكل 8.23 (أ) G هي منطقة الشبكة الكبرى المصدرة (المولد) والتي لها مستوى عطل ثلاثي الطور مقداره 20 000 ميكا فولت أمبير عند قضبان التوزيع S ذات الفولتية 400-kV . البيانات المناظرة لمنطقة الشبكة الكبرى المستلمة M (محرك) هي 10 000 ميكا فولت أمبير عند R . خط الـ 400 كيلوفولت القصير (L) له ممانعة توال مقدارهـا 40 أوم طور . الحمل المنقول هو 150ميكاواط ذو عامل قدرة متأخر 0.8 وفولتيـة 360 كيلوفولت عند R . أحسب تيارات العطل اذا حدثت دائرة قصيرة الى الأرض على طور واحد عند S. خلال الفترة دون العابرة لكلا المنطقتين . يمكننا أن نفترض أن ممانعات التتابع السالب والصفري تكون100 % و50 % على التوالي من قيم التتابع الموجب لمنطقتي الشبكة الكبرى و 100 % و 200 % للخط . المقاومات يمكن أهمالها G و M كلاهما مؤرض مباشرة .



شكل 8.23 (أ) شبكة التتابع الموجب قبل حدوث العطل
(ب) مكافيء ثفنن للتتابع الموجب (ج) ترابط التتابع

الحل

تيار العطل للمولد = $20\,000/(\sqrt{3}\times 400) = 28{\cdot}9$ كيلو أمبير

مفاعلة المصدر = $(400/\sqrt{3})/28{\cdot}9 = 231/28{\cdot}9 = 8$ اوم / طور

الممانعة الداخلية للمحرك = 16 أوم / طور

اذا عددنا V_R طورا مرجعا فعند ذلك $V_R = 208\underline{/0^\circ}$ كيلو فولت / طور

$$\text{تيار الحمل} = [150/(\sqrt{3}\times 360\times 0{\cdot}8)](0{\cdot}8 - j\,0{\cdot}6)$$
$$= 0{\cdot}24 - j\,0{\cdot}18 \text{ kA/phase}$$
$$V_S = (208 + j\,0) + (0{\cdot}24 - j\,0{\cdot}18)(j\,40)$$
$$= 215{\cdot}2 + j\,9{\cdot}6 \text{ kV/phase.}$$

هذه هي الفولتية (المتوازنة) عند نقطة العطل قبل حدوث العطل وهي القيمة التي ستستعمل لـ V_f في الفقرة 8.4.10

شكل 8.23 (ب) يبين مكافيء تفنن عند نقطة العطل لشبكة التتابع الموجب لشكل 8.23 (أ) . مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري هي 7 j و 7 j و 3·83 j أوم على التوالي وترابطها مبين في شكل 8.23 (ج) . وبذلك فان تيار العطل الجاري من موصلات الطور a الى العطل عند S يكون كما معطى بالمعادلة [8.28] مع الاستعاضة عن $\mathbf{E}_{an}$ بـ $\mathbf{V}_f$ وكما بينا في الفقرة 8.4.10.

$$\mathbf{I}_{ae}=\frac{3(215{\cdot}2+j\,9{\cdot}6)}{j\,7+j\,7+j\,3{\cdot}83}=1{\cdot}62-j\,36{\cdot}3\text{ kA.}$$

تيار التتابع الموجب في طور a المغذى من المولد الى العطل يكون

$$\frac{1{\cdot}62-j\,36{\cdot}3}{3}\times\frac{56}{64}=0{\cdot}472-j\,10{\cdot}56\text{ kA}$$

بينما التيار المغذى من المحرك يكون

$$\frac{1{\cdot}62-j\,36{\cdot}3}{3}\times\frac{8}{64}=0{\cdot}067-j\,1{\cdot}51\text{ kA.}$$

تيارات التتابع السالب تكون نفسها أما تيار التتابع الصفري في طور a المغذى الى العطل من المولد فيكون

$$\frac{1{\cdot}62-j\,36{\cdot}3}{3}\times\frac{88}{92}=0{\cdot}517-j\,11{\cdot}57\text{ kA}$$

والتيار المغذى من المحرك يكون

$$\frac{1{\cdot}62-j\,36{\cdot}3}{3}\times\frac{4}{92}=0{\cdot}023-j\,0{\cdot}527\text{ kA.}$$

تيارات العطل هذه يجب أن نضيف اليها تيار الحمل والذي يكون كله ذا تتابع موجب لكي نحصل على التيار الفعلي في أي جزء من المنظومة. تيار التتابع الموجب في طور a الجاري من المولد يكون

$$(0{\cdot}472-j\,10{\cdot}56)+(0{\cdot}24-j\,0{\cdot}18)=0{\cdot}712-j\,10{\cdot}74\text{ kA.}$$

تيار التتابع الموجب في طور a الجاري من المحرك يكون

$$(0{\cdot}067-j\,1{\cdot}51)-(0{\cdot}24-j\,0{\cdot}18)=-0{\cdot}173-j\,1{\cdot}33\text{ kA.}$$

وبذلك فان التيار الفعلي في طور a الجاري من المولد يكون

$$(0{\cdot}712-j\,10{\cdot}74)+(0{\cdot}472-j\,10{\cdot}56)+(0{\cdot}517-j\,11{\cdot}57) = 1{\cdot}701-j\,32{\cdot}87 \text{ kA.}$$

والتيار الفعلي في طور a الجاري من المحرك يكون

$$(-0{\cdot}173-j\,1{\cdot}33)+(0{\cdot}067-j\,1{\cdot}51)+(0{\cdot}023-j\,0{\cdot}527) = -0{\cdot}083-j\,3{\cdot}367 \text{ kA}$$

(or $0{\cdot}083+j\,3{\cdot}367$ kA to the motor).

ومجموع التيارات الفعلية هذه في الطور a يكون

$$(1{\cdot}701-j\,32{\cdot}87)+(-0{\cdot}083-j\,3{\cdot}37) = 1{\cdot}618-j\,36{\cdot}24 \text{ kA}$$

والذي هو تيار العطل الفعلي $\mathbf{I}_{ac}$ الذي تم ايجاده قبلا .

تيارا الطورين b و c للمنظومة يمكن حسابهما باستعمال المعادلة [8.9] .

يمكننا الحصول على حل بديل أخريعطينا التيارات الفعلية (تيارات الحمل زائدا العطل) عن طريق حساب القوى الدافعة الكهربائية للمولدوالمحرك قبل حدوث العطل على افتراض ان هذه القوة الدافعة الكهربائية ستبقى بدون تغيير خلال فترة العطل . القوى الدافعة الكهربائية للمولد والمحرك تكون

$$\mathbf{E}_G = (208+j\,0)+(0{\cdot}24-j\,0{\cdot}18)(j\,48) = 216{\cdot}6+j\,11{\cdot}52 \text{ kV/phase}$$
$$\mathbf{E}_M = 205{\cdot}1-j\,3{\cdot}84 \text{ kV/phase.}$$

وشبكة ترابط التتابع لعطل ارضي تكون مشابهة لتلك المبينة في شكل 8.23 (جـ) الا أن هناك الآن مصدرين منفصلين للتتابع الموجب للـ ق .د. ك . هما $\mathbf{E}_G$ و $\mathbf{E}_M$ كل منهما يغذي الجزء الخاص به من شبكة التتابع الموجب . اذا اختزلنا الشبكة كلها الى شبكة مثلثية مكافئة فعلى الطالب ان يدقق أن المفاعلة بين مصادر الـ ق . د . ك هي j 105·1 أوم والمفاعلة عبر الـ ق . د . ك . للمولد هي j 20·39 أوم والمفاعلة عبر الـ ق . د . ك . للمحرك هي j 142·8 أوم . التيار القادم من المولد في طور a يكون

$$(216{\cdot}6+j\,11{\cdot}52)/j\,20{\cdot}39 = 0{\cdot}566-j\,10{\cdot}6 \text{ kA}$$

والتيار القادم من المحرك يكون

$$(205{\cdot}1-j\,3{\cdot}84)/j\,142{\cdot}8 = -0{\cdot}0268-j\,1{\cdot}44 \text{ kA.}$$

من الواضح أن حاصل جمع هذين التيارين يعطينا تيار التتابع الصفري الجاري في شكل 8.23 (ج) . ثلاثة أضعاف هذا التيار تساوي تيار العطل I_{ae} الذي تم ايجادة قبلا .

8.5 شبكات ترشيح المركبات المتماثلة

Symmetrical Component Filter Networks

هذه الشبكات تستعمل في منظومات القدرة الثلاثية الطور لقياس المركبات المتماثلة للتيار أو الفولتية . تيار تتابع صفري يشير عادة الى عطل أرضـي على المنظومة ولكنه يمكن أن يكون كذلك يسبب تيارات تسرب غير متوازنة على سطوح عوازل وسخة أو تيارات شحن خط الى أرضي غير متوازنة . تستعمل فولتية التتابع الصفري لاستقطاب مرحلات عطل أرضي اتجاهية (أنظر الفقرة 9.4.4) .
وتيارات التتابع السالب هي المسؤولةعن تسبيب حرارة زائدة لدوارات المنوبات (انظر الفقرة 7.6) . فولتية التتابع الموجب تستعمل أحيانالتشغيل منظم الفولتية الذاتي (AVR) المسيطر على اثارة المنوب (انظر الفقرة 7.9) . سنناقش الان القليل فقط من الدوائر المتوفرة .

8.5.1 تيار التتابع SEQUENCE CURRENT

تيار التتابع الصفري يمكن قيأسه عن طريق ربط مقياس تيار (أومرحل) عبر محولات تيار العطل المماثلة لبضها (C.T.s). المربوطة على التوازي (مربوطة استبقائياً) (انظر المعادلة [8.10]) . اذا كانت الدائرة الابتدائية مكونة من قابلو ثلاثي اللب فاننا نحتاج الى محول تيار واحد فقط يثبت فوق القابلو على شرط ان يقطع غلاف وتسليح القابلو وتطوى نهايتيهما سوية وتبعد ان خارج محور التيار C.T. . هذه الـ C.T.s المربوطة استبقائياً تقيس التيار المتبقي والذي يساوي ثلاثة أضعاف تيار التتابع الصفري . دائرة قياس تيار التتابع السالب مبينة في شكل 8.24 . من هذه الدائرة

$$(\mathbf{I}_a-\mathbf{I})\mathbf{Z}_a+(\mathbf{I}_c-\mathbf{I})\mathbf{Z}_c-\mathbf{IZ}=0$$

$$\mathbf{I}=(\mathbf{I}_a\mathbf{Z}_a+\mathbf{I}_c\mathbf{Z}_c)/(\mathbf{Z}_a+\mathbf{Z}_c+\mathbf{Z})$$

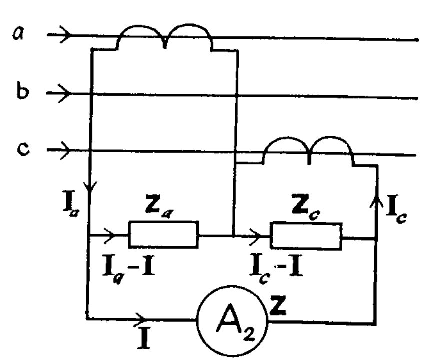
$$=\frac{\mathbf{I}_{a1}(\mathbf{Z}_a+\mathrm{h}\mathbf{Z}_c)+\mathbf{I}_{a2}(\mathbf{Z}_a+\mathrm{h}^2\mathbf{Z}_c)+\mathbf{I}_{a0}(\mathbf{Z}_a+\mathbf{Z}_c)}{\mathbf{Z}_a+\mathbf{Z}_c+\mathbf{Z}}.$$

وبماأن(Z_a+Z_c) لايمكن ان تكون صفراً فان تيار التتابع الصفري يمكن اخماده باستعمال محولات تيار مساعدة ، اووسيطه . هناك طريقة مبسطة تتم باستعمال محولي تيار أثنين (كل محولات التيار الاربعة تكون مماثلة لبعضها تماماً) في خط b وتربط كل منهما على التوازي ، وبقطبيه معاكسة ، عبر احدى محولات التيار الموجودة . على الطالب ان يحلل الان هذه الدائرة المحورة ويبين ان تيارمقياس التيار سوف لايعتمد على تيار التتابع الموجب اذا كانت Z_a و Z_c متساويتين رقمياً وزاويتي ممانعتيهما تختلف بمقدار $120°$.

هذا الشرط يجب ان يتحقق بدون تضمين مقاومة سالبة . وأحد الحلول الممكنة هو

$$Z_a = Z'\underline{/-90°} \quad \text{and } Z_c = Z'\underline{/+30°} \text{ ohms}$$

حيث ان Z' هي أي قيمة أومية من العبء الأومي المقنن لل C.T.s . اذا جعلنا ممانعة مقياس التيار Z اقل كثيرا من Z' فعل الطالب أن يبين ان تيار التتابع السالب يكون ثلث قراءة مقياس التيار . وعليه كذلك ان يتبصر في كيفية تحوير هذه الدائرة بحيث ان مقياس التيار يعطينا قراءة تتناسب مع تيار التتابع الموجب وتكون مستقلة عن تيارات التتابع السالب والصفري . (في شكل 8.24 تم وضع C.T.s بصورة كيفية في الخطين a و c مع قطبياتهما المبينة . هل هناك خيار أحسن وخصوصاً الخيار الذي بموجبه تكون احدى الممانعات مقاومة نقية) . عمل الدائرة المذكورة أعلاه يجب أن يدقق بفرض ان هناك خطأ ارضي على خط a .



شكل 8.24 دائرة لقياس تيار التتابع الصفري

8.5.2 فولتية التتابع SEQUENCE VOLTAGE

فو لتية التتابع الصفري يمكن قياسها باستعمال محول فولتية ثلاثي الطور (V.T.) ذي ابتدائي مربوط نجمياً ومؤرض مباشرة وله ثانوي مفتوح (او مقطوع) مربوط مثلثياً وقد ربط عبره مقياس فولتية . ان مقياس الفولتية سيقيس المجموع الطوري للفولتيات خط الى ارضي الثلاث (الفولتية المتبقية) والتي تساوي ثلاثة أضعاف فولتية التتابع الصفري . وهذا الـ V.T. يجب أن لايكون ذا تركيب من نوع ذي القلب الثلاثي الطرف (انظر الفقرة 6.10) .

دائرة لقياس فولتية التتابع الموجب مبينة في شكل 8.25 . ال V.T.s الأثنتان تكونان متطابقتين تماماً . وبذلك

$$\mathbf{V}_{ab} = \mathbf{I}_a\mathbf{Z}_a + (\mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b)\mathbf{Z}$$
$$\mathbf{V}_{bc} = \mathbf{I}_b\mathbf{Z}_b - (\mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b)\mathbf{Z}$$

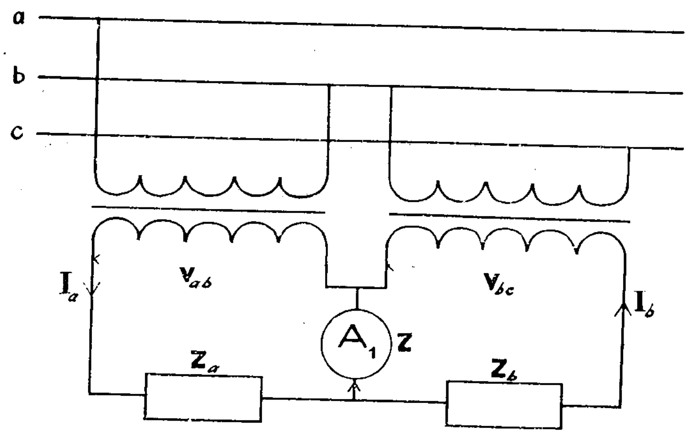
وبحل هاتين المعادلتين يكون التيار في مقياس التيار كما يلي

$$\mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b = \frac{\mathbf{V}_{ab}\mathbf{Z}_b - \mathbf{V}_{bc}\mathbf{Z}_a}{\mathbf{Z}_a\mathbf{Z}_b + \mathbf{Z}(\mathbf{Z}_a + \mathbf{Z}_b)}$$

فولتيات الخط الثلاث $\mathbf{V}_{ab}$ و $\mathbf{V}_{bc}$ و $\mathbf{V}_{ca}$ ليس لها مركبة تتابع صغري . اذا اخذنا $\mathbf{V}_{ab}$ طوراً مرجعاً فان

$$\mathbf{I}_a - \mathbf{I}_b = \frac{\mathbf{V}_{ab1}(\mathbf{Z}_b - \mathrm{h}^2\mathbf{Z}_a) + \mathbf{V}_{ab2}(\mathbf{Z}_b - \mathrm{h}\mathbf{Z}_a)}{\mathbf{Z}_a\mathbf{Z}_b + \mathbf{Z}(\mathbf{Z}_a + \mathbf{Z}_b)}.$$

هذه المعادلة مستقلة تماماً عن فولتية التتابع السالب عندما $\mathbf{Z}_b = \mathbf{Z}_a\underline{/120^\circ}$ أي أن الممانعتين تكونان متساويتين رقمياً وزاويتاهما تختلفان بمقدار 120° .
الحل الممكن هو أن تكون $\mathbf{Z}_a = Z'\underline{/-90^\circ}$ و $\mathbf{Z}_b = Z'\underline{/30^\circ}$. اذا فرضنا أن ممانعة مقياس التيار يمكن اهمالها مقارنة مع Z' (والتي لكونها عبءً على ال V.T. ستكون لها قيمة (أومية عالية) فعل الطالب أن يبين أن تيار مقياس التيار هو V_{ab1}/Z' . عمل الدائرة أعلاه يجب أن يدقق بفرض أن فولتيات الخط تكون منظومة ثلاثية الطور متوازنة وأن ممانعة مقياس التيار تكون صفراً .



شكل 8.25 دائرة لقياس فولتية التتابع الموجب .

المراجع

LACKEY, C. H. W. 1951. *Fault calculations.* Oliver and Boyd, Edinburgh.

MORTLOCK, J. R. & HUMPHREY DAVIES, M. W. 1952. *Power system analysis.* Chapman and Hall, London.

WAGNER, C. F. & EVANS, R. D. 1933. *Symmetrical components.* McGraw-Hill, New York.

WESTINGHOUSE (Ed.) 1964. *Electrical transmission and distribution reference book.* Westinghouse Electric Corporation, Pennsylvania, U.S.A.

مســــائـــل

في كل المسائل التالية على الطالب أن يفترض . مالم ينص على عكس ذلك ،
أن كل مصادر ال ق.د.ك. تكون متوازنة وتكون مثارة الى الفولتية المقننة ومتطابقة في الطور وأن المقاومة يمكن اهمالها وأن كل المفاعلات المحسوبة بنسبة الوحدة (p.u.) لماكنة تكون معتمدة على القيمة المقننة لتلك الماكنة وأن تتابع الطور هو اما *abc* او *RYB*

1. ثلاثة منوبات 6·6 كيلو فولت ذات قيم مقننة 2000 و 5000 و 8000 كيلو فولت أمبير وذات مفاعلات بنسبة الوحدة 0·08 و 0·12 و 0·16 على التوالي مربوطة الى قضيب توزيع مشترك . يصل قابلو مغذ ذو مفاعلة 0·125 اوم بين قضيب التوزيع ومحطة فرعية احسب MVA الخطأ اذا حدث عطل متماثل ثلاثي الطور عند المحطة الفرعية.

(87·2 MVA)

2. محــول ثلاثـي الطـور ذو ربـط نجمــي / نجمي يغـذي حمـلاً نجمياً مقداره 400+j 600 اوم / طور خلال خط نقل كل من موصلاته له ممانعة 4+j 6 اوم .

الملف الثانوي للمحول له عدد لفات تساوي ثلاثة اضعاف عدد اللفات في الملف الابتدائي

الابتدائي $R = 0{\cdot}5, \quad X = 2{\cdot}5\ \Omega/\text{phase}$

الثانوي $R = 5{\cdot}0, \quad X = 25{\cdot}0\ \Omega/\text{phase}$

يغذى المحول من منوب ذي قيم مقننة 1500 كيلو فولت أمبير و 11 كيلو فولت ومفاعلة عابرة 0·2 بنسبة الوحدة . أوجد فولتية الطرف الثانوي للمحول عندما تكون فولتيــة الطرف الابتدائـي تساوي 11 كيلو فولت .
جد تيار المنوب اذا حدثت دائرة – قصيرة مباشرة على كل الاطوار عند منتصف الخط .
ال ق.د.ك. خلف المفاعلة العابرة لمنوب يمكن أن تعد ثابتة .

(340 A, 31 kV)

3. ثلاثة منوبات نجمية الربط ربط كل منها على التوالي مع ملف مفاعل محــدد للتيار متشابه الى قضيب توزيع مشترك . كل من المنوبات له قيمة مقننة 10 ميكافولت أمبير ومفاعلة دون العابرة لكل طور 0·06 بنسبة الوحدة . محولتان 11/33 كيلو فولت ذواتا قيمة مقننة 15 ميكا فولت أمبير ومفاعلة 0·03 بنسبة الوحدة و 10 ميكا فولت أمبير ومفاعلة 0·02 بنسبة الوحدة على التوالي ربطتا على التوازي الى قضيب التوزيع لتغذيا خط نقل ذا ممانعة 0·2 + j 0·7 اوم كم . عند محطة فرعية تبعد 10 كم عن محطة

التوليد يوجد محول 25 ميكا فولت أمبير- 33/11 كيلوفولت وذو مفاعلة 0.06 بنسبة الوحدة . احسب مفاعلات الملف المحدد للتيار لـكـل منوب اذا كان علـى المنوب أن لايحمل أكثر من 2½ تيـار الحمل الكامل عند حدوث دائرة قصيرة متماثلة على قضيب التوزيع 11 كيلوفولت في المحطة الفرعية .

جامعة لندن (0.837 Ω)

4 . محطة قدره تحتوي على ثلاثة منوبات 50 هيرتز ثلاثية الطور كل منها 200 ميكافولت أمبير وذو مفاعلة تزامنية 0.9 بنسبة الوحدة . هذه المكائن الثلاث تشتغل بتحميل متساو وربط الى كل منها محول 11/132 كيلوفولت ذي 200 ميكافولـت أمبير مفاعله 0.09 بنسبة الوحدة . قضيب التوزيع 132 كيلوفولت يغذي خط نقل قصير 132 كيلوفولت له مقاومة 0.5 أوم ومحاثة 8 ملي هنري لكل موصل طـور . مقاومات المكائن والمحول يمكن اهمالها . حمل 400 ميكاواط ذو عامل قدرة متأخر مقداره 0.8 تم تجهيزه من قبل الخط اذا أخذنا احدى فولتيات الطور عند طرف الحمل من الخط مرجعا ذا 0/0°1 بنسبة الوحدة . فاحسب ال ق.د.ك. للطور المناظر في اي من المنوبات . اذا حدثت دائرة قصيرة ثلاثية الطور عند طرف الحمل من خط النقل . فاحسب تيار العطل للحالة المستقرة عند هذه النقطة .

(جامعة ليدز) (4130 A، 1.703/24° 20′)

5 . ثلاثة منوبات 11 كيلوفولت مقننة عند 10 000 كيلوفولت أمبير وذات مقاومة 0.02 ومفاعلة دون العابرة 0.15 بنسبة الوحدة ربطت قضبان التوزيع الخاصة بهـا الى ملفات مفاعلة مربوطة شبكيا ثلاثية الطور كل ملف منها له مقاومة 0.015 بنسبة الوحدة ومفاعلة 0.09 بنسبة الوحدة لكل طور على قيمة مقننة 10 000 كيلوفولت أمبير . ربط محـول 20 000 كيلوفولت أمبير ذو مقاومة 0.01 بنسبة الوحدة ومفاعلة 0.10 بنسبة الوحدة الى قضيب توزيع احدى المكائن ويغذى عند 132 كيلوفولت خط نقل له مقاومة 9 أوم ومفاعلة 30 أوم لكل طور . أوجد التيار الذي سيجري في كل ماكنة عند قصر الأطوار الثلاثة سوية عند طرف الحمل من الخط .

اذا أردنا وضع قاطع دورة زيتي عند نقطة العطل بحيث ان قيمته المقننة تحدد بظرف العطل هذا فما أقل قيمة مقدرة له ؟

(جامعة لندن) (1725 A، 1075 A، 1075 A، 73·7 MVA)

6 . محطة قدره لها قضبان توزيع ثلاثة أجزاء . وذات مولدات 11 كيلوفولت . مربوطة على المنظومة الحلقية وكما يلي :

الجزء الاول : مولدان ذوا 30 و 20 ميكافولت أمبير ومفاعلتان 0·15 و 0·12 بنسبة الوحدة على التوالي .

الجزء الثاني : مولد واحد ذو 60 ميكافولت أمبير ومفاعلة 0·2 بنسبة الوحدة

الجزء الثالث : مولدان ذوا 30 و 60 ميكافولت أمبير ومفاعلتان 0·18 و 0·2 بنسبة الوحدة على التوالي .

الأجزاء 1 و 2 ، 2 و 3 ، 3 و 1 مربوطة خلال ثلاثة ملفات مفاعلة ذات قيم مقننة 60 ، 90 و 80 ميكافولت أمبير مع مفاعلات ذات قيمة 0·2 ، 0·3 ، 0·24 بنسبة الوحدة على التوالي . جد تيار العطل عند حدوث عطل ثلاثي الطور متماثل عند الطرف البعيد لمغذ ذي مفاعلة 0·05 بنسبة الوحدة ومقاومة 0·01 بنسبة الوحدة وذي قيمة مقننة 30 ميكافولت أمبير مربوط الى الجزء الثالث لقضيب التوزيع . جد كذلك التيار المجهز بوساطة مولد ذي ميكا فولت إمبير مربوط على الجزء الثالث من قضيب التوزيع تحت هذه الظروف .

(جامعة لندن) (6760 A ,17 800 A)

7 . تيارات الخط في منظومة ثلاثية الطور هي $\mathbf{I}_a = 60 + j\,40$ و $\mathbf{I}_b = -80 + j\,20$ و $\mathbf{I}_c = 20 - j\,60$ أمبير . احسب المركبات المتماثلة لهذه التيارات للطور a .

$$(\mathbf{I}_1 = 6{\cdot}9 - j\,8{\cdot}87,\ \mathbf{I}_2 = 53 + j\,48{\cdot}8,\ \mathbf{I}_0 = 0)$$

8 . فولتيات منظومة ثلاثية الطور هي $\mathbf{V}_a = 1000/35^\circ$ و $\mathbf{V}_b = 3000/100^\circ$ و $\mathbf{V}_c = 2000/270^\circ$ حلل هذه الفولتيات الى مركباتها المتماثلة للطور a .

$$(\mathbf{V}_1 = 1077/186^\circ\,20',\ \mathbf{V}_2 = 1800/5^\circ\,40',\ \mathbf{V}_0 = 516/79^\circ)$$

9 . محول 132/11 كيلو فولت ذو خمسة أفرع له دائرة T مكافئة تحتوي على مفاعلة تسرب طور على الابتدائي والثانوي تساوي 20 أوم و 0·2 أوم ومفاعلة

مغنطة مقدارها 2160 أوم على الجانب الابتدائي . اهمل كل المقاومات . مفاعلات تتابع المصدر هي $X_1 = 15\,\Omega$ و $X_0 = 7\,\Omega$ لكل طور . احسب تيار العطل عند حدوث عطل أرضـي على طرف ثانوي واحد لأنواع الربط التالية (1) مثلثي / نجمي مع نقطة تفرع نجمي مؤرضة (2) نجمي مع نقطة تفرع نجمي مؤرضة / مثلثي (3) نجمي مع نقطة تفرع نجمي مؤرضه / نجمي مع نقطة تفرع نجمي مـؤرضة (4) نجمي / نجمي (5) نجمي / نجمي مع نقطة تفرع نجمي مؤرضة .

(1185 A، 0, 15 400 A ، 0, 20 900 A)

10. منوبان ثلاثيا الطور يولدان قوى دافعة كهربائية غير متساوية في المقدار ولكنها ذات فرق طور متساوٍ مربوطان الى قضيب توزيع واحد . احسب التيار الدوار في الطور الأحمر والفولتية الى الأرضي عند نقطة التفرع النجمي للمنوب B . نقطة التفرع النجمي للمولد A مربوطة مباشرة الى الأرضـي بينما التي للمنوب B مربوطة خلال مفاعلـة $1\,\Omega$

ق . د . ك : طور المتولدة	B	Y	R
منوب A	850	900	1000
منوب B	900	1100	900

مفاعلات التتابع (Ω)	X_0	X_2	X_1
منوب A	1·0	2	4
منوب B	1·5	5	6

(جامعة لندن) (46·8 V، 19·35 A)

11. في النية نصب قاطع دورة لحماية منوب ثلاثي الطور مربوط نجميا وذي فولتية 11 كيلوفولت له مفاعلات تتابع موجب وسالب وصفري مقدارها 10 و 7 و 3 اوم وقد تم ربط محايد المنوب الى الارضي خلال مفاعلة 1 أوم . اذا كانت القيمة المقننة للقاطع ستحدد بالتيار الإعظم الذي سيجري تحت ظـرف مفاعلة صفر للعطل فما ستكون تلك القيمة المقننة وما الفولتيـــة القصوى لمحايد المنوب فـوق الأرضي ؟

(جامعة لندن) (828 V، 15·8 MVA)

12. اذا حدثت دائرة قصيرة خط الى خط بين الطورين b و c لمنظومة 132 كيلوفولت فاحسب تيار العطل والفولتية الى المحايد لطور a عند نقطة العطل . مفاعلات التتابع

الموجب والسالب والصفري من التوليد الى نقطة العطل هي 12 و10 و 8 أوم على التوالي أهمل المقاومة .

(جامعة ليدز) (59.2 kV , 6000 A)

13 . المفاعلات / طور للتتابع الموجب والسالب والصفري لمولد متزامن ثلاثي الطور هي $0.6\,\Omega$ و $0.5\,\Omega$ و $0.2\,\Omega$ على التوالي . اهمل مقاومات الملفات . حدثت دائرة قصيرة بين الخطين Y و B والارضي عند اطراف المولد . تتابع فولتيات الطور للمولد هي RYB والق . د . ك للطور R هي ($6000+j\,0$) فولت .
احسب من المباديء الاولية تيارات التتابع في الطور R والتيار في دائرة رجوع الارضي (أ) اذا كانت نقطة محايد المولد مربوطة مباشرة الى الارضي (ب) اذا كانت نقطة المحايد معزولة . في كل حالة ارسم المخطط الطوري لكي تبين تيارات التتابع نسبة الى ق . د . ك للطور R .

(جامعة لندن)(j 5460 : j 17 310 A, j 5770, j 2310, −j 8080
0, 0 أمبير) .

14. حدث عطل خط واحد الى ارضي ذي مقاومة $0.05\,\Omega$ على منظومة ثلاثية الطور مجهزة بوساطة مولد متزامن ذي ق . د . ك . 11 كيلوفولت بين الخطوط . مفاعلات التتابع الموجب والسالب والصفري للمنظومة من نقطة العطل الى المولد هي $0.5\,\Omega$ و $0.2\,\Omega$ و $0.1\,\Omega$ على التوالي . اهمل المقاومات . محايد المولد أُرض خلال مقاومة $0.2\,\Omega$.
احسب تيار العطل من المباديء الأولية .

جامعة لندن (17 400 A)

15 . مولد متزامن مربوط نجميا ثلاثي الطور غير محمل له قوى دافعة كهربائية متوازنة ثابتة تعطي 11 كيلوفولت بين اي زوج من اطراف الخط RYB . ممانعات التتابع الموجب والسالب والتي تعتبر ثابتة هي $(0+j\,0.9)\,\Omega$ و $(0+j\,0.4)\,\Omega$ لكل طور على التوالي . حدد من المباديء الاولية قيمة التيار الذي سيجري في دائرة قصيرة بين الطرفين Y و B . خذ الق . د . ك . للطور R بوصفه طورا مرجعا. احسب كذلك فروق الجهد بين ازواج اطراف الخط .

(جامعة لندن) (5865 V, 8450 A)

16. حدث عطل بين الطورين الاصفر والأزرق على قضيب التوزيع لمنوب له عند لحظة نشوء العطل مفاعلات تتابع طور كما يلي

$Z_1 = 0+j\,1{\cdot}0\,\Omega : Z_2 = 0{\cdot}1+j\,0{\cdot}2\,\Omega : Z_0 = 0+j\,1{\cdot}0\,\Omega.$

الق . د . ك . لطور المولد هي 1000 فولت
احسب من المبادىء الاوليه . تيارات الخط والفولتية خط-الىالمحايد للطور الخالي من العطل .
(جامعة لندن) (373 V, 1440 A)

17 . محطة توليد لها مولد ذو 5000 كيلوفولت امبيرمع مفاعلة دون العابرة مقدارها 8% ومولد ذو 4000 كيلوفولت امبير مع مفاعلة دون العابرة مقدارها 6 % مربوطان على التوازي الى قضيب توزيع ثلاثي الطور . 11 كيلو فولت50 هيرتز . القيمة المقننة لمفاتيح التوزيع switchgear في المغذيات الخارجة من قضبان التوزيع هي 180 ميكا فولت أمبير .

في النية توسيع المحطة عن طريق ربط مصدر شبكة الى قضبان التوزيع للمحطة خلال محول 10 000 كيلوفولت امبير له مفاعلة تسربية مقدارها 10 % . لغرض حماية مفاتيح التوزيع الموجودة في المحطة يجب تركيب ملف مفاعل محدد للتيار عند نقطة ربط المصدر بقضبان التوزيع في المحطة . احسب القيمة التي نحتاجها لهذا المفاعل بالاوم

احسب هبوط الفولتية عبر المفاعل عند حدوث دائرة قصيرةتحت ظروف عطل ممانعة صفر متماثل .

(جامعة لندن) (3·15 kV, 1·185 Ω)

18 . مولد ثلاثي الطور . 50 هيرتز . 3000 كيلوفولت أمبير . نقطة التفرع النجمي له مؤرضة خلال مقاومة ومربوط الى قضبان توزيع 6·6 كيلوفولت . هناك محول رافع للفولتية T_1 يتغذى من قضبان التوزيع مربوط نجمي نجمي وذوفولتية 33/6·6 كيلوفولت ونقطة تفرعه النجمي على جانب الـ 33 كيلوفولت فقط مربوطة مباشرة الى الارضي تغذي قابلوا . على الطرف البعيد للقابلو هناك محطة ثانوية تتغذى من خلال محول خافض للفولتية T_2 مربوط مثلثي نجمي وذوفولتية 33/6·6 كيلوفولت ونقطة تفرعه النجمي مربوطة مباشرة الى الارضي . احسب تيار العطل الناشيء عند قضبان الفولتية

الواطئة في المحطة الثانوية لـ (أ) عطل خط الى خط ذي ممانعة – صفر (ب) عطل خط الى الارض ذي مقاومة 1 اوم . قيم ممانعات التتابع بالاوم معطاة ادنـــــاه .

	Z_1	Z_2	Z_0	
المولد	j 2	j 1·5	j 0·5	منسوبة الى جانب الـ 6·6 كيلوفولت
المحول T_1	j 1·8	j 1·8	j 18·0	
المحول T_2	j 1·6	j 1·6	j 1·6	
القابلو	j 0·3	j 0·3	j 0·3	

(جامعة لندن) (934 A, 640 A)

19 قضبان توزيع 11 كيلو فولت لمحطة قدرة مقسمة الى ثلاثة أجزاء A و B و C مربوطة فيما بينها بحلقة من الملفات المفاعلة وكما يلي : A و B 10% على 20 ميكا فولت أمبير . وبين B و C 8 % على 20 ميكا فولت أمبير وبين C و A 12 % على 20 ميكا فولت أمبير . يوجد على كل جزء منوب ذي قيمة مقننـــة 30 ميكا فولت أمبير وله مفاعلة مقدارها 20 %. على الجزء B يوجد محول مقنن عند 45 ميكا فولت أمبير وذي فولتية 132/11 كيلو فولت له مفاعلـــة مقدارها 12·5 % . احسب مستوى العطل المتماثل الثلاثـــي الطور على جانب الفولتية العالية من المحول .

(172 MVA) (L.C.T.)

20 . قضبان التوزيع لمحطة قدرة 33 كيلو فولت مقسمة الى جزأين A و B مفصولين عن بعضهما بملف مفاعل ذي مفاعلة 1·5 اوم / طور . توجد على الجزء A مجموعتان 20 ميكا فولت أمبير كل منهما لها مفاعلة (عابرة) مقدارها 18 % على 20 ميكافولت أمبير . غذي الجزء B من شبكة 132 كيلو فولت عن طريق محولين 25 ميكا فولت أمبير مماثلين لبعضهما مربوطين على التوازي وكل منهما لـــه مفاعلة مقدارها 12·5 % على 25 ميكا فولت أمبير . مستوى العطل الثلاثـــي الطور الداخل عند الشبكة هو 2500 ميكا فولت أمبير. احسب مستوى الميكا فولت أمبير لعطل ثلاثـــي عند A وعند B . ماذا ستكون قيمة المفاعلة التـــــي نحتاجها لـــكل محول 25 ميكا فولت أمبير لـــكـــي تقلل مستوى العطل عنـــــد نقطة B الى 500 ميكا فولت أمبير ؟

(% 19·7 , 514 MVA, 454 MVA) (L.C.T.)

21. قضيب توزيع 11 كيلو فولت مقسم الى أربعة أجزاء 1 و 2 و 3 و 4 . المولدان 1 و 4 كل منهما مقنن عند 50 ميكا فولت أمبير . وله مفاعلة مقدارها 16 % أحدهما مربوط الى الجزء 1 والاخر الى الجزء 4 . كذلك المولدان 2 و 3 كل منهما مقنن عند 25 ميكا فولت أمبير وله مفاعلة 14 % أحدهما مربوط الى الجزء والأخر الى الجزء 4 كل من الأجزاء الأربعة مربوط بملف مفاعل مقنن عند 30 ميكا فولت أمبير ذي مفاعلة 5 % الى قضيب رابط. الاجزاء 2 و 3 كل منهما مربوط الى قضيب توزيع شبكة 132 كيلو فولت بوساطة محول مقنن عند 45 ميكا فولت أمبير ولـــه مفاعلة مقدارها 12.5 % ومستوى العطل الثلاثـي الطور المغذى عند قضيب

توزيع الشبكة هو 2000 ميكا فولت أمبير . احسب مستوى العطل الثلاثـــي الطور بالميكافولت أمبير عند الجزء 1 وعند الجزء 2 . كذلك احسب الميكا فولت أمبير المغذاة من المحطة الى عطل على قضبان توزيع الشبكة .

MVA, 782MVA, 639MVA) (L.C.T.)

22. تم ربط جزئـي قضيب توصيل 11 كيلو فولت بوساطة ملف مفاعل ذي قيمـــة حمل نافذ مقننة 25 ميكا فولت أمبير ومفاعلة / طور مقدارها 10 % على الأساس 25 ميكا فولت أمبير . وكل من الجزأين تم ربطه الى قضيب توزيع 33 كيلو فولت غير مجزء بوساطة محول 20 ميكا فولت أمبير له مفاعلة 10 % على 20 ميكا فولت أمبير . ربط الى قضيب التوزيع 33 كيلو فولت مجموعتا مولد – محول كل منهما مقننة عند 37.5 ميكا فولت أمبير وكل منهما له مفاعلة كلية مقدارهـــا 25 % على 37.5 ميكا فولت أمبير . قضيب التوزيع ذو 33 كيلو فولت مربوط الى قضيب توزيع الشبكة ذي 132 كيلو فولت بوساطة محولتين مماثلتين لبعضهما ومربوطتين على التوازي وكل منهما مقننة عند 45 ميكا فولت أمبير ولها مفاعلـــة مقدارها 12.5 % على 45 ميكافولت أمبير . منسوب العطل الثلاثي الطور المغذى من الشبكة هو 2000 ميكا فولت أمبير . أحسب مستوى العطل الثلاثـي الطور بالميكافولت أمبير عند قضيب التوزيع ذي 11 كيلو فولت مع الملف المفاعل وبدونه (المفاعل مقصورة الدائرة) وعند قضيب التوزيع 33 كيلو فولت . احسب ميكا فولت أمبير العطل الثلاثـي الطور المغذى من المحطة الى عطل على قضيب توزيع شبكة الـ 132 كيلو فولت .

(297MVA، 1028MVA، 685MVA، 500MVA) (L. C. T.)

23. منطقة شبكة مصدره لها مستوى عطل عابر ثلاثـي الطور مقداره 20 000 ميكا فولت أمبير (عند 400 كيلو فولت) عند نهاية الأرسال لمغذي الربط ذي الـ400 كيلو فولت . منطقة الشبكة المستوردة عند نهاية الأستلام لها مستوى عطل مقداره 10 000 كيلو فولت أمبير (عند 400 كيلو فولت) . مغذّي الربط له مفاعلـة مقدارها 40 أوم / طور . الحمل المنقول مقداره 150 ميكا واط ذو عامل قدره متأخر 0·8 وفولتية 360 كيلو فولت مقاسة عند نهاية الأستلام . اذا حدث عطـل ثلاثـي الطور عند نهاية الأرسال لمغذي الربط فاحسب التيار في مسار العطـل من المنطقة المصدرة والى المنطقة المستوردة . خذ الفولتية 360 كيلو فولت بوصفهـا مطاوراً مرجعاً . أفرض أن القوى الدافعـة الـكهربائيـة خلف المفاعلات العابرة ثابتة .

(0·068 + j 3·67 kA, 1·44 − j 27·13 kA, 1·372 − j 30·8 kA) (L.C.T.)

24. مولد 11 كيلوفولت مربوط نجمياً ذو تتابع طور *abc* مربوط الى محول *Yd1* 132/11 كيلو فولت نجمـي / مثلثـي . الحمل على جانب الـ132 كيلو فولت يتالف من حمل متوازن 40 ميكا واط عند عامل قدرة متأخر 0·8 عبر *A* و *B* و *C* وحمـل طور مفرد 10 ميكا واط عند عامل قدره متأخر 0·9 عبر *B* و *C* . أهمل كل القدرة الضائعة وأحسب مركبات التتابع الموجب والسالب للتيار . وتيار الخط مـن طور *a* للمولد .

(3,030 A ; 583 A, 200 A) (I.E.E.)

25 مصدر ثلاثـي الطور أربعة أسلاك ذو تتابع طور *RYB* . مركبات التتابـع الموجب والسالب للتيار في خط *R* الجارية باتجاه الحمل هي $200\underline{/0^\circ}$ أمبير و $100\underline{/60^\circ}$ أمبير على التوالـي . تيار المحايد الجاري باتجاه المصدر هو $300\underline{/300^\circ}$ أمبير . أحسب مقدار وطور تيارات الخط الثلاثة . اذا كانت القوى الدافعـة الـكهربائية للمصدر تكون منظومة متماثلة واذا كان عامل قدرة حمل طور *R* هو 0·867 متقدماً فأحسب عوامل القدرة لتياري الخط الأخرين .

(—، متقدم 0·867, 0 A; $300\underline{/-120^\circ}$, $300\underline{/0^\circ}$) (I.E.E.)

26 منظومة ثلاثية الطور 132 كيلوفولت يمكن ان تمثل بمصدر مؤرض مباشـــرة يغذي محولا نجمي / مثلثي 132/33 كيلوفولت نقطة تفرعها النجمي مؤرضة مباشرة كذلك. اذا حدث عطل ارضـي على احد أطراف جانب الـ 132 كيلوفولت من المحول عندما يكون جانب الـ 33 كيلوفولت غير مربوط الى الحمل فأوجد تيار العطل الى الارض والتيار في الملف المثلثي للمحول. مفاعلات التتابع عـــلى الاساس 100 ميكا فولت أمبير هي كما يلي :

	المصدر	المحول
موجب :	% 20	% 15
سالب :	% 15	
صفر :	% 10	

(985 A ,3200A) (L.C.T.)

27. منوب ثلاثي الطور. 150 ميكا فولت امبير 13 كيلوفولت له مفاعلات تتابع موجب وسالب وصفري مقدارها 20 و 15 و 5 % على التوالي على الاساس المقنن للماكنة. اذا كان المنوب يشتغل بدون حمل عند الفولتية المقننة فأحسب قيمــه المقاومة الى الأرضي بالأوم لكي تحدد تيار عطل أرضي على الاطراف الى 75 أمبير. تم أثارة فولتية المنوب الى 1·1 بنسبة الوحدة وربط الى محول 12/275 كيلوفولت. 140 كيلوفولت أمبير. مثلثي / نجمي مؤرض مباشرة له مفاعلـــة مقدارها 12% على قيمته المقننة. ربطت نقطة التفرع النجمي الى قضيب أرضي بوساطة شريط ذي ممانعة مهملة ولكن الربط بين القضيب الارضي والارض الحقيقية سيحسب وكأن له مقاومة مقدارها أوم واحد. أحسب فولتية القضيـــب الارضي الى الارض الحقيقية خلال عطل أرضي على طرف ذي فولتية 275 كيلوفولت.

(1·41 kV) (L.C.T.)

28. قضيب توصيل 33 كيلوفولت له منسوب تغذية عطل ثلاثي الطور مقداره 1000 ميكا فولت أمبير. مفاعلات المصدر للتتابع السالب والصفري هي 2/3 و 1/3 من مفاعلة التتابع الموجب. مقاومة المصدر للتتابع الصفري هي 60 أوم. محـول مربوط نجمي مؤرض مباشرة / مثلثي 30 ميكا فولت أمبير ذو فولتية 132/33 كيلوفولت له مفاعلة مقدارها 0·1 بنسبة الوحدة تم تغذيته من قضبان التوصيل

ذات 33 كيلوفولت . احسب تيار العطل بالكيلو أمبير وميكا فولت أمبير العطل عند الاطراف ذات 132 كيلوفولت للمحول لانواع العطل التالية (i) عطل ثلاثي الطور (ii) عطل أرضي (iii) عطل طور الى طور و (iv) عطل طور الى طور الى الأرضي (مزدوج أرضي) . أحسب الميكافولت أمبير المقننة لقواطع الدورة التي نحتاجها لازالة كل عطل .

$I_e = 1{\cdot}164, I_b = I_c = 1{\cdot}07,$ (120; 0·91, 85·8; 1·12, 231; 1·01, (L.C.T.)
(246,180, 257, 163; 231,

29 . منوب ثلاثي الطور مربوط نجميا ومؤرض بمقاومة مقدارها 100 % ذو قيم مقننة 37·5 ميكافولت أمبير و 11 كيلوفولت وذو مفاعلات تتابع موجب وسالب وصفري مقدارها 20 و 15 و 5 % على التوالي . ربط المنوب الى محمول Yd1 66/11 كيلوفولت ذي ربط نجمي مؤرض مباشرة / مثلثي مقنن عند 25 ميكا فولت أمبير وله مفاعلة تسربية مقدارها 10% . اذا حدث عطل أرضي على طرف 66 كيلوفولت فأحسب تيار العطل ثم احسب تيار العطل في جانب 11 كيلوفولت . دقق الجواب عن طريق نقل مركبات التتابع لتيار العطل لا 66 كيلو فولت خلال المحول .

(4260A , 1230 A) (L.C.T.)

30 . مستوى العطل الثلاثي الطور عند قضبان توصيل 33 كيلوفولت من محطة قدره هو 1500 ميكا فولت أمبير . افترض ان $X_1 = X_2 = X_0$. محولان متشابهان تماما مربوطان نجمي مؤرض مباشرة / مثلثي قيمها المقننة هي 45 ميكا فولت أمبير 132/33 كيلوفولت يشتغلان على التوازي ثم ربطهما الى قضبان التوزيع ذات 33 كيلوفولت . كل محول له مفاعلة تسربية $12\frac{1}{2}$ % (على القيمة المقننة) .
(أ) لعطل ثلاثي الطور على قضبان التوزيع 132 كيلوفولت أحسب ميكا فولت أمبير العطل وتيار العطل (ب) لعطل أرضي على قضبان 132 كيلوفولت أحسب تيار العطل (ج) اذا ربطنا نقطتي التفرع النجميتين ذواتي 132 كيلوفولت . مباشرة الى قضيب أرضي ومن ثم أرضنا هذا القضيب عن طريق منظومة قطب أرضي لها مقاومة الى الارض الحقيقية مقدارها 10Ω فأعد حساب تيار العطل على فرض أن (i) كلتا نقطتي التفرع النجميتين مؤرضتان (ii) نقطة تفرع نجمية واحدة مؤرضة فقط . (دائرة مفتوحة عارضة على الاخر) .

(1·85 kA, 2·27kA, 2·38kA, 2·13kA; 487 MVA) (L.C.T.)

31. مصدر 33 كيلوفولت مؤرض مباشرة له مستوى عطل ثلاثي الطور مقداره 5000 ميكافولت أمبير ولنفرض أن مفاعلات التتابع الثلاثة له متساوية. هذا المصدر يغذي محولاً 5 ميكافولت أمبير 33/6·6/1·5 كيلوفولت ذا ربط نجمي / نجمي مؤرض مباشرة / ثالثي – مثلثي له مفاعلات تسربية بين أزواج الملفات وكما يلي : الابتدائي الثانوي 8 %. الابتدائي – الثالثي 13 % . الثانوي – الثالثي 4 % كلها على الاساس 5 ميكافولت أمبير. الابتدائي مربوط الى المصدر ذي 33 كيلو فولت. اذا حدث عطل أرضي على قضبان التوزيع 6·6 كيلوفولت فأحسب تيار عطل أرضي اذا كانت نقطة التفرع النجمي للأبتدائي (أ) معزولة (ب) مؤرضة مباشرة .

(6·4 kA, 5·72 kA) (L.C.T.)

32. محولان متشابهان تماماً مربوطان نجمي / نجمي / ثالثي مثلثي يشتغلان على التوازي لهما نسب لفات طور 1 : 1 : 1. ملفاتهما الابتدائية غير مؤرضة. مفاعلات التسرب لكل طور بين أزواج الملفات هي : ابتدائي-ثانوي 1/2 أوم وابتدائي – الثالثي 3/4 أوم وثانوي – الثالثي 1 أوم. كلها منسوبة الى الملف المذكور اولا. احسب توزيع تيار العطل خلال كل المنظومة لعطل ارضي على قضيب التوزيع R على الجانب الثانوي اذا (أ) أرضت نقطة تفرع نجمي واحدة فقط للثانوي و (ب) أرضت كلتا نقطتي التفرع النجميتان ولكن قاطع دوره ابتدائي واحد مفتوح. ال ق. د. ك. للمصدر هي 6 كيلوفولت / طور وله ممانعة داخلية مقدارها صفر. الأجوبة المعطاة هي لـ (أ) التيار الى الارض والتيار في طور الثانوي المصاب بالعطل من المحول المؤرض و (ب) التيار الى الارض والتيار في طور الثانوي المصاب بالعطل للمحول الذي تم فتح قاطع دورة الابتدائي له .

(2kA , 12kA ; 8kA , 12 kA) (L.C.T.)

33. منوب ثلاثي الطور مربوط نجمياً ومؤرض مباشرة منسار الى 10 كيلو فولت / طور له مفاعلات تتابع موجب وسالب صفري مقدارها 10 و 8 و 6 أوم /طور على التوالي. تم ربطه بوساطة قابلو قصير ذي ممانعة صفر الى الملف الابتدائي لمحول نجمي / نجمي / ثالثي–مثلثي كلا نقطتي تفرعه النجمي مؤرضة مباشرة له مفاعلات تتابع بين ازواج الملفات مقدارها : ابتدائي – ثانوي 15 اوم وابتدائي –

ثالثي 12 أوم وثانوي – ثالثي 5 أوم / طوركلها على منسوب فولتية 10 كيلو فولت / طور. اذا حدث عطل ارضي على الطور a من القابلو فأحسب (أ) توزيع تيار العطل خلال كل منظومة الـ 10 كيلو فولت / طور مفترضاً أنه لاتوجد تغذية من الجانب الثانوي من المحول و (ب) تيار العطل الى الأرض اذا ربط الثانوي الى قضيب توصيل لانهائي مؤرض مباشرة ومثار الى 10 كيلو فولت / طور. (الأجوبة كلها هي تيارات متأخرة متفاعلة بالأمبير جارية باتجاه العطل وبالترتيب a و b و c ونسبةالى $\mathbf{E}_{an}$) .

(L.C.T.) ((أ) 1365 الى العطل ، المنوب 1213 ، ‎-152 ، ‎-152 ، ‎-152 ، 909 من ارضي المحول 152 ، 152 ، 152 ، 456 من الأرض ؛ (ب) 1971)

34 . باستخدام البيانات المعطاة في المسألة 33 نفسها ولـكن مع عطل أرضـي مزدوج على القابلو أعد حساب توزيع التيار مفترضاً عدم وجود تغذية من ($b-c-e$) جانب الثانوي . الجواب يعطـي تيار العطل الـكلـي الجاري باتجاه الأرض ونسبة الى $\mathbf{E}_{an}$.

(+j 1581 A) (L.C.T.)

35 محول 275/132/33 كيلو فولت ربطه نجمي / نجمي / ثالثي – مثلثي وكل من الأبتدائي والثانوي مقنن عند 180 ميكا فولت أمبير أما الثالثي فأن له قيمة مقننة لعطل زمن – قصير ولكن ليس له مقنن – حمل . فحوص دائرة قصيرة ثلاثية الطور أجريت على ازواج الملفات مع فتح دائرة الملف الثالثي أعطت النتائج التالية ، الأدخال كان الى الملف المذكور اولاً :

ابتدائي – تانوي : 22·08 كيلو فولت ، 300 أمبير.
ابتدائي – ثالثي : 32·85 كيلو فولت ، 300 أمبير
ثانوي – ثالثي : 14·03 كيلو فولت ، 700 أمبير

احسب مفاعلة ملفات الأبتدائي والثانوي والثالثي للدائرة المكافئة على الأساس 100 ميكا فولت أمبير وقدر القيمة المقننة لمحطة الفحص التي نحتاجها لأجراء الفحوص أعلاه . أهمل المقاومات .

(; 20·2 MVA, 4·71 1·96%, 3·66%) (L.C.T.)

36 . مولد ثلاثي الطور له مفاعلة عابرة مقدارها 0·2 بنسبة الوحدة يغذي محركاً له مفاعلة عابرة مقدارها 0·5 بنسبة الوحدة عن طريق خط له مفاعلة مقدارها 0·05 بنسبة الوحدة . للحمل فولتية $0·95/0°$ بنسبة الوحدة وتيار 0·75 بنسبة الوحدة وعامل قدره يساوي واحد وكل هذه القيم تم قياسها عند أطراف المحرك . اذا حدثت دائرة قصيرة ثلاثية الطور عند أطراف المحرك فأحسب التيار الكلي من المولد والى المحرك . أفرض ان القوى الدافعة الكهربائية خلف المفاعلات العابرة تكون ثابتة .

(0·75 + j 1·9 p.u. ، 0·75 − j 3·8 p.u.) (L.C.T.)

37 . البيانات التالية ترجع الى مجموعة منوب – محول : المنوب ذو قدرة مقننة 120 ميكاواط ، عامل قدرة متأخر 0·8 ، $X_d = 188\%$ ، $X'_d = 23\%$ ، $X''_d = 16\%$ (كلها على المقنن) . المحول ذو قدرة مقننة 135 ميكا فولت أمبير و $X = 15·3\%$ (على المقنن) . اذا كان المنوب يشتغل بتيار حمل كامل مع عامل قدره متأخر 0·8 مقاساً عند أطراف الفولتية العالية للمحول وكانت الفولتية عند النقطة نفسها تساوي $1·06/0°$ بنسبة الوحدة فأحسب القوى الدافعة الكهربائية خلف المفاعلة التزامنية ، العابرة ودون العابرة كذلك احسب التيار لدائرة قصيرة ثلاثية الطور (دائرة قصيرة ثلاثية الطور عند أطراف الفولتية العالية) والـ ق . د . ك . خلف المفاعلة العابرة المناظرة . اذا كانت الـ ق . د . ك . خلف المفاعلة العابرة تتناقص أسياً بين القيم التي تم حسابها مع ثابت زمن مقداره 1·75 ثانية فاحسب الـ ق . د . ك . خلف المفاعلة العابرة عند مرور 0·12 ثانية بعد نشوء العطل عندما تكون الماكنة في حالة حمل ثم اوجد تيار العطل المناظر (ج . م . ت بنسبة بوحده) . افرض ان الـ ق . د . ك . خلف المفاعلة التزامنية تكون ثابتة وأهمل التيار المستمر العابر .

(1·27, 3·2, 0·44 + j 0·31; 0·8 − j 1·12, 1·26 + j 0·26; 1·3 + j 0·32, 2·29 + j 1·63,)
(L.C.T.)

38 . مولد متزامن ثلاثي الطور مربوط عن طريق مغذ ذي اربعة أسلاك الى حمل حراري متوازن 10 ميكا واط ، 11 كيلو فولت وذي عامل قدره مقداره واحد . المولد المغذي سويـة لهما مفاعلات مقدارها (0 + j 0·4) و (0 + j 0·2) و (0 + j 0·2) بنسبة الوحدة الى تيارات التتابع الموجب والسالب والصفري

على التوالي على الأساس 11 كيلو فولت و 10 ميكا فولت أمبير. حدث قطع في الموصل R عند الحمل. اوجد (أ) الفولتية عبر القطع و (ب) التيارات في Y و B وفي موصلات المحايد. أفرض ان القوى الدافعة الكهربائية للمولد تبقى ثابتة .

(536, 536, 536 A : 6·64 kV) (I.E.E.)

الفصل التاسع

الحمايـــة

PROTECTION

9.1 مقدمة

اذا تعرضت منظومة قدرة كهربائية لعطل (أو أي ظرف غير طبيعي آخر) . فأن ذلك العطل يجب ان يزال بأسرع مايمكن من جميع الأجزاء المكهربة المجهزة . وذلك (أ) لأستعادة استقرارية المنظومة (الفصل السابع والجزء الثاني من هذا الكتاب) ، وهذا يعني المحافظة على اشتغال المولدات الأخرى تزامنياً وكذلك (ب) لتقليل التلف في نقطة العطل . نتيجة الحريق والأنفجار . وأيضاً في ذلك الجزء من المنظومة الذي يحمل تيار العطل حيث يسبب هذا رفع درجة حرارته .

الحمايـة هي الفن أو العلم الذي يبحث في أكتشاف وجود العطل والمبادرة بالفتح الصحيح لقاطع الدورة (C.B.s) (أنظر الجزء الثاني من هذا الكتاب) . ان منظومة الحماية تتألف من محولات تيار حمائية (C.T.s) . محولات فولتية (V.T.s) وكذلك مرحلات حماية مع ملحقاتها من الأسلاك والربط (يشار لها على أنها جزء التيار المتناوب من المنظومة) وتشمل أيضاً مرحلات التوصيل التي تغلق الدائرة من بطاريات المحطة الى ملف الأفلات في قاطع الدورة (يشار لها على أنها جزء التيار المستمر من المنظومة) .

تقسم منظومة حماية متكاملة الى مناطق - ضمنية على سبيل المثال منطقة مولد . محول . وجزء قضبان توزيع أو مغذي - وكل منطقة تحتوي على منظومة حماية واحدة أو أكثر متناسقة فيما بينها ومربوطة اليها (ويشار اليها كلها بوصفها مشروع حماية) . في بعض الأحيان تشبه الحماية قسط تأمين . كلفة رأس المال والصيانة للمشروع يكون

القسط نفسه . بينما يكون الربح هو امكان منع حصول فقدان استقرارية المنظومة وتقليل التلف الى أقل مايمكن .

لمصنع ثمين أو غالي التكاليف فان هذا القسط يمكن تسويغه بسهولة . ولكن لمناطق حمل خفيف بعيدة قد تكون كلفة الحماية معادلة لأرباح عدة سنوات من الدخل لذا فالحالة هنا تكون العكس . مع ذلك يجب الأهتمام لخسارة المستهلك في الأرباح والمواد المصنعة فيما اذا فقد تجهيز الطاقة لفترة طويلة من الزمن . والعامل الرئيسي هو احتمال تعرض حياة الأفراد الى الخطر .

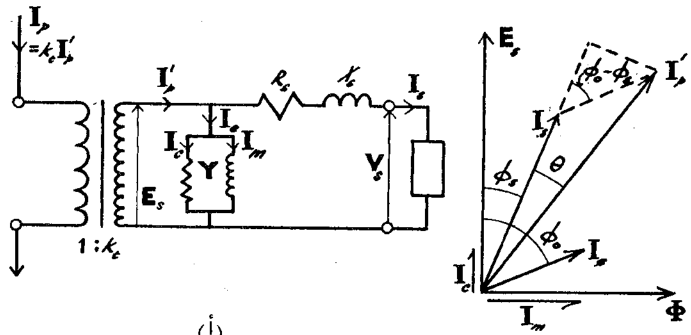
ان الأتجاه الحديث هو جعل منظومة الحماية ستاتيكية وهذا يعني استبعاد كافة الأجزاء المتحركة باستخدام محاثة تحويل على سبيل المثال وكذلك أنصاف الموصلات الألكترونية .

ان بعض المنظومات التي سوف يشار اليها في هذا الفصل هي شبه ستاتيكية حيث تكون الأجزاء المتحركة فيها عبارة عن مرحلات الخرج النهائية (والتي تفلت قاطع الدورة) حيث تكون اعتيادياً من نوع مرحلات ذات المنتج المنسحب (أو المرحلات البريدية) .

في هذا الفصل سيعالج موضوع الحماية وصفيا فقط وكذلك إستيضاحاً للمبادىء الاساسية بدلاً من الدخول بتفاصيل المنظومات الموجودة – ولهذه الاخيرة يشار على الطالب بان يطلع على نشرات المصنعين لهذه الاجهزة . وكذلك للتفاصيل العملية الكثيرة التي لايمكن ذكرها في هذا الكتاب . حيث يشار ايضا على الطالب بان يطلع على المواصفات القياسية العالمية في هذا المجال وخاصة المواصفات القياسية البريطانية (B.S.) والتي سنأتي على ذكرها في نهاية هذا الفصل .

9.2 محولات التيار Current Transformers (C.T.s.)

يعد محول التيار من اهم الاجزاء المكونة في جميع منظومات الحماية ويقوم هذا المحول بتقليل التيارات العالية في دائرة الابتدائي الى قيم صغيرة جداً في دائرة الثانوي . ومحول التيار يقوم ايضا بعزل دائرة الثانوي بضمنها مرحلات الحماية من الفولتية العالية في دائرة الابتدائي . اما دائرة الثانوي فتؤرض في نقطة واحدة . التيارات المقننة لدائرتي



(أ) (ب)

الشكل 9.1. محول تيار

(أ) دائرة مكافئة (ب) مخطط طوري

الابتدائي والثانوي لمحول التيار تكون تلك القيم المؤشرة على لوحة التسمية (وهذا يطبق على اي كمية مقننة) . ان اداء محول التيار يعطي بصيغة الجزء او مضاعفات التيار المقنن (ومثال على ذلك 20 مرة بقدر التيار المقنن) . والمواصفات القياسية البريطانية B.S.S. 3938 تعين تيار الابتدائي المقنن لحد 75 kA وتيار الثانوي المقنن 5 A أو 1 A .أما العبء على محول تيار فهو الحمل (بضمنه اسلاك التوصيل) المربوط على اطراف دائرة الثانوي ويقدر بالاوم . أو بالفولت امبير عند تيار الثانوي المقنن وتحسب هذه عادة عند عامل قدرة متأخر 0·7 . في هذه الصيغة الاخيرة . يكون العبء مساويا الى خرج محول التيار. ان محول تيار كبيرا تكون قدرته المقننة 15 VA . ويكون العبء المناظر له 15 أوم لتيار مقداره 1 A او 0·6 أوم لمحول تيار ذي 5 A .

ان تركيب ونظرية محول التيار تشابه تماما تلك التي تكون لمحولات القدرة . ولكن الفرق الاساسي هو ان محول القدرة يعد ثابت الفولتية . ويعد ايضا جهازاً يعمل بالتوازي . بينما محول التيار هو جهاز يعمل بالتوالي وتياره ثابت . (وفي اي ظروف اشتغال معطاة) . اما الفولت امبير VA الداخل لمحول تيار . وعندما يتغير العبء بين قيمة المتطرفة لحالة الدائرة المفتوحة وحالة الدائرة القصيرة على جهة الملف الثانوي . تكون غير مهمة اذا ماقورنت مع الـ MVA خلف التيار الابتدائي . لذلك فان تيار الابتدائي لايتأثر بادخال

محول التيار في الدائرة . تأمل الان الدائرة المكافئة لمحول ما حيث يمكن هنا اهمال قيمة المقاومة والمفاعلة التسربية للملف الابتدائي (في هذا المضمار) لكونهما تؤثران على الفولتية عبر طرفي الابتدائي فقط . ومن المفيد وضع دائرة الاثارة المربوطة على التوازي على جهة

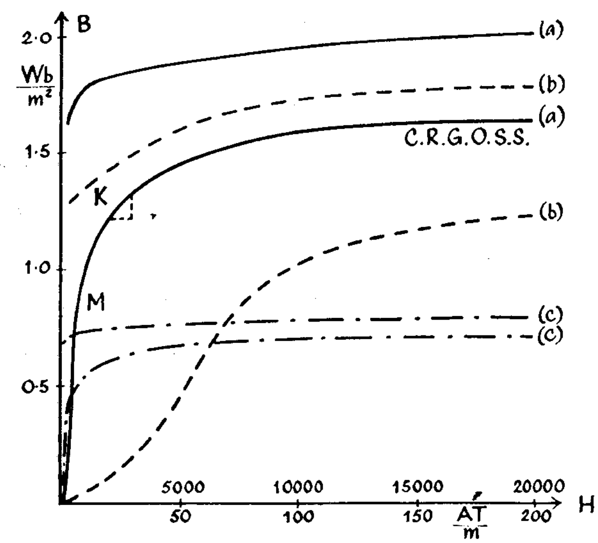
الثانوي من المحول ويشار الى كافة الـكميات لهذه الجهة بحيث يمثل I'_p تيار الابتدائي على جهة الثانوي من المحول . وكما مبين في الشكل 9.1 (أ) . ومن I'_p يستخلـــص I_e لاثارة المجال المغناطيسي في قلب المحول ويحث فولتية E_s التي تكون مسؤولة عن سريان التيار I_s .

ان تيار الاثارة هو سبب خطأ التيار (يكون هنا نسبة) وخطأ الطور لمحول تيار ما لتيار ابتدائي كبير . يحاول محول التيار امرار تيار مناظر له في الملف الثانوي له . وهذا يحتاج الى ق . د . ك في الثانوي كبيرة ويحتاج ايضا الى كثافة فيض في القلب وتيار اثارة كبيرين . ويمكن الوصول الى مرحلة بحيث ان اية زيادة اخرى في تيار الابتدائي قد تمتص كلها . بازدياد تيار الاثارة نفسه وبالتالي لاتحدث اية زيادة تذكر في تيار الثانوي للمحول . مثل هذه المحولات للتيار يقال عنها بانها متشبعة .

ان الدائرة البسيطة المظهر الموضحة في الشكل 9.1 (أ) تكون من الناحية العملية معقدة التحليل . حيث ان العلاقة بين E_s و I_e تكون غير خطية (انظر الشكل 9.2) . عملية طرح I_e من I'_p يجب ان تنفذ اتجاهيا ولـكن علاقات الطور الضرورية قلما تكون معروفة . ان E_s هي حاصل ضرب التيار I_s مع الممانعة الـكلية لدائرة الثانوي . و I_s هي الـكمية غير المعروفة التي يتطلب ايجاد قيمتها لتيار معين في دائرة الملف الابتدائي . وان I_e لايمكن ايجاده الا بمعرفة قيمة E_s . ممانعة العبء تكون عادة غير ثابتة وهي دالة للتيار I_s . لهذا فان معظم الـكميات تكون مترابطة فيما بينها وبعض هذه العلاقات تكون غير خطية .

الشكل 9.2 يوضح منحنى تمغنط الدائرة المفتوحة لمحول تيار لثلاثة انواع مـــن المعادن النموذجية التي تستخدم في تصنيع قلب المحول . تأمل منحنى الـ C.R.G. O.S.S. (وهذا يستخدم لمحولات التيار المستخدمة في الحماية) . من الواضح ان النفاذية تكون قيمتها قليلة عند قيم قليلة لـكثافة الفيض . وتزداد الى اقصى قيمة عند M . وبعدها تقل في منطقة التشبع . المسامحة اللاخطية $Y = I_e/E_s$ لدائرة الاثارة المربوطة عـــلى التوازي تتغير عكسيا مع النفاذية . ويتغير عامل القدرة $\cos \phi_o$ لتيار الاثارة من حوالي 0·8 متأخراً عند اثارة واطئة . الى حوالي 0·6 متأخراً عند M ورجوعاً الى حوالي 0·8 متأخراً عند K : وتؤخذ على هذا الاساس قيمة متوسطة مقدارها 0·7 متأخراً لعامـل القدرة . للاغراض العملية يقترب محول التيار من حالة التشبع عند K . التي يطلق عليها

نقطة الانحناء (الركبة) والتي تعرف على انها تلك النقطة التي اذا ازدادت عندها الفولتية المسلطة بنسبة 10% تسبب زيادة في تيار الاثارة مقدارها 50% . من المهم هنا ان ندرك انه في منطقة التشبع . يحتوي تيار الاثارة على مركبات توافقية وذلك بسبب المسامحة اللاخطية لدائرة الاثارة نفسها . وخاصة التوافقيات الثلاثية والتي تتسبب في اعطاء صيغة موجةالتيار مميزات تعدد الذرى . عليه فان تيار الثانوي سوف يكون لاجيبيا ايضا . تحت هذه الظروف من التشبع . فان المخطط الطوري الموضح في الشكل 9.1 (ب) سوف لايكون بالأمكان تطبيقه في هذه الحالة . وذلك لكون المخطط الطوري يمكن ان يمثل تردد واحد فقط .



الشكل 9.2. منحنيات التمغنط

(ا) فولاذ سيليكوني (3%) بارد الدرفلة منتظم الحبيبات

(ب) فولاذ . سيليكوني(4%)حارالدرفلة

(ج)حديدنيكل(77 % نيكل Ni . 14 % حديد Fe)

يمكن تصنيف محولات التيار الى نوعين . النوع الاول له ابتدائي تكون ملفات التيار فيه على شكل قضيب وهو موصل مستقيم متمركز الوضع (قد يستطيل لمسافة قصيرة على جانبي محول التيار) ويعد جزء من منظومة القدرة (وقد يكون على سبيل المثال قضيباً للتوزيع) وليس بالضرورة ان يكون جزء من محول التيار نفسه . اما الثانوي فيلف

بانتظام على مجمل محيط القلب الحديد وهذا بدوره يكون عادة على شكل حلقـــة (annular حلقات من الصلب) . لذلك فان الفيض المتسرب من الابتدائي والثانوي كليهما يكاد يكون مهملا . ولان الابتدائي يحتوي على لفة واحدة . يكون التيار الاسمي او المقنن حوالي 400 امبير او اكثر . لـكي يجهز امبير لفات اثارة كافية ليعطي خرجـــا مناسبا بنسبة خطأ معقولة . والنوعية الدنيا لمحولات التيار ذات الابتدائي القضيبي المذكور هي محولات التيار ذات الجلبة والتي تثبت على جلبة عازلة في داخلها موصل مستقيم . بسبب كبر قطر الجلبة . فان محولات التيار هذه تمتلك مساراً مغناطيسياً وتيار اثارة كبيرين نسبيا . اما النوع الثاني فهو محولات التيار ذات الابتدائي الحاوي على لفات . وقد يحتوي الابتدائي على لفة واحدة او اكثر وبسبب قلة عدد اللفات هذه فانها عادة لايمكن لفها بانتظام على القلب الحديد . ان مثل هذه المحولات تميل الى تسريب فيض عال منهـا . وتكون قلوبها عادة مصنعة [مصنوعة من رقائق صلب مقصوصة على شكل T . I . E او L)

ان محولات التيار المستخدمة في القياس تصمم لغرض استعمالها مع الأجهزة والمقاييس ويتطلب منها اعطاء دقة عالية لجميع تيارات الحمل صعوداً الى 125.% من التيار المقنن . القلوب المصنوعة من النيكل والحديد تستخدم بصورة رئيسية في محولات التيار المستخدم للقياس وذلك لأن الأنفاذية العالية التي يمتلكها هذ النوع من القلوب تجعل تيار الأثارة اللازم قليلاً بحيث يقل مقدار الخطأ : كذلك فان التشبع المطلق الذي يحدث تقريباً عند قيم واطئة نسبياً من كثافة الفيض (وكذلك فولتية الثانوي) يمنع من احتمال تغذية أجهزة القياس بتيار شديد أثناء حصول عطل في المنظومة .

أما الفولاذ السليكوني والذي يكون عادة من نوع C.R.G.O.S.S. فيستخدم لمحولات التيار الحمائية والتي لايجب ان تتشبع حتى في حالات مرور تيارات عالية في الثانوي . وعليه يجب ان تمتلك تيارات اثارة ونسبة أخطاء معقولتين . الحد المضبوط لتيار الأبتدائي يكون مؤشراً على لوحة التقدير المثبتة على محول التيار ويكون هذا التيار أعلى قيمة لتيارالابتدائـي والذي عنده يبقى محول التيار مشتغلاً ضمن دقـة معلومة عندما يربط عليه العـبء المقنن لـه . عندمـا يعبرعـن هـذا التيـار بمضاعفات التيار المقنن فيسمى حينئـذ بعامـل حـدود الدقـة المقننة : والقيمـة القصوى المعينـة

لهذا العامل هي 30 . ان تيار حد الدقة يجب ان يساوي في الاقل تيار العطل الاقصى في مكان محول التيار نفسه . وتيار الزمن – القصير المقنن هو قيمة ج . م . ت لمركبة التيار المتناوب لتيار الابتدائي الذي يستطيع محول التيار حمله عندما يربط عليه عبء مقنن بدون ان يحصل فيه أي عطب بسبب التاثيرات الحرارية او الميكانيكية . عندما يعبر عن تيار الزمن القصير المقنن بمضاعفات التيار المقنن فعند ذلك يسمى بعامل الزمن القصير . ان القوى الميكانيكية الحادثة تكون بسبب التيار الذروي للدورة الكبيرة الاولى للتيار والذي يؤخذ على اساس 2·55 مضروباً بقيمة ج . م . ت . للتيار المتماثل . (انظر الشكل 7.9 والجزء 2) اما التاثيرات الحرارية (I^2Rt) فتكون بسبب تيار الزمن – القصير المقنن عندما يمر خلال الزمن المقنن (قيمته الكبرى تكون اعتيادياً ثلاث ثوان) . واذا فرض ان I^2t (ثانية -kA^2) يساوي مقداراً ثابتاً يمكن حسابه لقيم الزمن القصير للتيار I والزمن t . فانه من الممكن تخمين الزمن (اكبر من الزمن المقنن) الذي فيه يكون تيار العطل (اصغر من تيار الزمن القصير المقنن) يمكن ان يبقى على منظومة قدرة بدون حدوث عطب يذكر (عدا ذلك الذي على نقطة العطل نفسها) . (وهذه المناقشة يمكن تطبيقها على عموم مكونات منظومة قدرة خلال الزمن الابتدائي القصير الذي يكون تبدد الحرارة خلاله مهملاً) .

وتعين نسب الخطا في محول تيار حمائي عند التيار المقنن وكذلك عند تيار حد الدقة وعليه تكون نسبة خطأ التيار كالاتي

$$\text{نسبة خطأ التيار} = \frac{\text{النسبة الاسمية} - \text{النسبة الحقيقية}}{\text{النسبة الحقيقية}} \times 100 \%$$

$$= \frac{k_n - (k_t I'_p / I_s)}{k_t I'_p / I_s} \times 100\%$$

$$= \frac{k_n I_s - k_t I'_p}{k_t I'_p} \times 100\% \qquad [9.1]$$

حيث ان k_n هو النسبة الاسمية (نسبة التحويل للتيار المقنن) و k_t هو النسبة الحقيقية للفات في المحول . واذا افترض ان $k_n = k_t$ فعليه تكون نسبة خطأ التيار

$$= \frac{I_s - I'_p}{I'_p} \times 100\% \qquad [9.2]$$

$$= \frac{I_e}{I'_p} \cos(\phi_o - \phi_s) \times 100\%. \qquad [9.3]$$

ان نسبه خطأ التيار تكون عادة سالبة لـكون $I_s < I'_p$. واذا قلت لفات الثانوي بصورة جزئية (وتسمـى هذه العملية بتعويض اللفـات) فعندها يزداد I_s وتقل نسبة خطأ التيار .

خطأ الطور $= \theta \simeq \sin\theta$

أو أن

$$\text{خطأ الطور (بالدرجات النصف قطرية)} \simeq \frac{I_e}{I'_p} \sin(\phi_o - \phi_s) \qquad [9.4]$$

ويعرف على أنه موجب اذا كان (معكوس) $\mathbf{I}_s$ يسبق التيار $\mathbf{I}'_p$.

لقد تمت الاشارة سلفاً الى ان ϕ_o و ϕ_s يكونان حوالي $45°$ بصورة عامة . عليه فان الخطأ الطوري يميل الى الصفر .

ان المعادلتين [9.3] و [9.4] يمكن استخراجهما من

$$\mathbf{I}_e = \mathbf{E}_s\mathbf{Y} = \mathbf{I}_s\mathbf{Y}\mathbf{Z}_s = \mathbf{I}_s YZ_s \underline{/\phi_s - \phi_o} \qquad [9.5]$$

حيث ان $\mathbf{Y}$ هي مسامحة دائرة الاثارة المربوطة على التوازي و $\mathbf{Z}_s$ هي الممانعة الـكلية لدائرة الثانوي متضمنة ممانعة العبء وأسلاك التوصيل . لذلك فان الخطأ يمكن تقليله بتقليل قيمة $\mathbf{Z}_s$ و $\mathbf{Y}$. حيث ان $\mathbf{Y}$ يمكن ان تقلل باستخدام قلب ذي انفاذية مغناطيسية عالية وكذلك استخدام مقاطع كبيرة ومسار مغناطيسي قصير . عمليا تعطى الاولوية الى الحاجة لفولتية تشبع عالية (وهذا يعني استخدام الـ C.R.G.O.S.S.) على الرغبة في تقليل الخطأ (وهذا يعني استخدام صلب من نوع حديد – نيكل) . وعليه يجب الابقاء على صغر الابعاد الفيزياوية للفولاذ (الصلب) قدر الامكان بحيث يمكن وضع المحول في فراغ محدود ضمن قاطع الدورة .

ان التيار I_e يدعى بالخطأ المتراكم لمحول التيار عندما يقاس اويعبر عنه بالنسبة المئوية في حدود دقة تيار الثانوي (I_{ALS}) . ولما كانت مركبات $\mathbf{I}_e$ هي السبب

لخطأ التيار والطور فان اي واحد من هذه الاخطاء لايمكن ان يزيد على الخطا المتراكم . ولما كان عامل القدرة ($\cos \phi_o$) لدائرة الاثارة غير معلوم اعتياديا ، فانه يمكن الحصول على تقريب متحفظ للخطأ من

$$\text{خطأ التيار} \leqslant (I_e/I_{ALS})\, 100\% \qquad [9.6]$$

$$\text{خطأ الطور} \leqslant (I_e/I_{ALS}) \quad \text{بالدرجات نصف القطرية} \qquad [9.7]$$

لذا فاذا كان تيار الاثارة يعادل 10 % من I_{ALS} (مقاس لـ $I_s = I_{ALS}$) يكون الخطأ المتراكم 10% ، ولايمكن ان يزيد خطأ التيار على10% ، وخطأ الطور لايمكن ان يزيد ايضا على 0·1 درجة نصف قطرية او 5·73° (وهذا الاخير متحفظ جدا) وتفترض المعادلة [9.6] ان $\mathbf{I}_e$ له طور $\mathbf{I}'_p$ نفسه : وفي المعادلة [9.7] يعد $\mathbf{I}_e$ متعامدا مع $\mathbf{I}'_p$. ومما تجدر الاشارة اليه ان تعريف الخطأ المتراكم المذكور أعلاه يتجاهل تأثير التوافقيات الناتجة عن التشبع (انظر المواصفات القياسية البريطانية (B.S. 3938) .

عند اضافة الفيض المتبادل الذي يتشابك مع ملفات الابتدائي والثانوي الى الفيض المتسرب من كلا الملفين للمحول فان كثافة الفيض في اجزاء معينة من القلب تزداد ، وعليه فان تيار الاثارة اللازم سوف يزداد : وفي هذه الحالةلايمكن اهمال اوتجاهل الفيض المتسرب من الابتدائي اطلاقا . تكون الزيادة في $\mathbf{I}_e$ هذه عند تحميل المحول وبصورة خاصة عندما يكون قريبا من التشبع ، بحيث لايمكن الحصول على الاخطاء بصورة دقيقة من عملية فحص الاثارة في حالة اللاحمل . محول التيار الذي فيه فيض متسرب ملحوظ يشار اليه بانه محول تيار ذو مفاعلة عالية . وعلى العكس فمحول التيار الذي يكون فيه الفيض المتسرب مهملا يشار اليه بانه المحول ذو المفاعلة القليلة (ومثال على ذلك المحول ذو الابتدائي القضيبي ، والمحول ذو القلب الحلقي المستخدم في معظم منظومات الحماية) . عليه فان الأخطاء في مثل هذه المحولات يمكن تعينها بدقة من فحص الاثارة في اللاحمل (كذلك ايضا يمكن تعين مقاومة ملفات الثانوي ونسبة اللف) . اذا كانت دائرة الثانوي مفتوحة فان تيار الأبتدائي كله يتحول الى تيار اثارة وعليه فان محول التيار سوف يتشبع وترتفع فولتية الثانوي بصورة كبيرة بحيث تصبح خطرة على الحياة وكذلك تجهد العازل المستخدم في محول التيار الى درجة الدمار . يمكن تصميم محولات التيار بحيث تمتلك مميزات خطية تقريبا . وذلك باستخدام قلوب حديدية ذات فجوات هوائية صغيرة . وتدعى هذه المحولات بمحولات التيار ذات الفجوة الهوائية الموزعة (D.A.G.C.T.) ولـكنها قلما تستخدم في الوقت الحاضر . ان

تيار العطل يكون معرضا لاحتوائه على مركبة تيار مستمر (انظر الشكل 7.9) ، وتاثير هذه المركبة على اشتغال محول التيار يكون مهما جدا عند مناقشة منظومة الحماية الوحدية (unit protective system) (أو التمييزية) ذات السرعة العالية .

9.3 تفسير مصطلحات الحماية Explanation of Protective Terms

لغرض السهولة ، سوف تعطى المصطلحات التالية على افتراض ان المرحل هو من النوع الذي يشتغل بالتيار وتكون ملامساته مفتوحة في الحالة الطبيعية (وهذا يعني ان ملامسات الافلات تكون مفتوحة عندما يكون المرحل غير مجهز بالطاقة) .

المعولية (الوثوق) : في حالة حدوث عطل في منطقة ما فان جهاز حماية تلك المنطقة يجب ان يبدأ بافلات قاطع الدورة الضروري لغرض عزل تلك المنطقة ، وتلك المنطقة فقط ، من جميع المصادر المكهربة . وان لم يستطع انجاز هذا العمل ، فان هذه الحماية يطلق عليها كلمة « فشل اشتغالي » : وللأغراض الاحصائية ، فان العمل اما أن يكون تاماً صحيحاً اومغلوطاً . ان المعولية تعني التصميم والنصب والادامة الصحيحة لجميع محولات التيار ومحولات الفولتية والمرحلات وكذلك التسليك بالنسبة لدوائر التيار المستمر والتيار المتناوب ؛ اضافة الى الافلات غير المتعمد للمرحلات الذي يحدث نتيجة الخطأ من قبل الاشخاص العاملين (وهذا يعني فشلاً اشتغالياً) . ولعموم منظومة تجهيز الطاقة الكهربائية في المملكة المتحدة تكون نسبة معولية الحماية 95% في الأقل .

التمييز : يقصد بالتمييز القدرة على تمييز العطل في المناطق المختلفة ، حيث يتم التفريق بين عطل داخلي في منطقة ما وعطل خارجي (خلالي) في أية منطقة أخرى . عليه فان جهاز الحماية يجب ان يشتغل ويفصل للعطل الداخلي فقط وان لايشتغل للعطل الخارجي . كذلك فان الحماية يجب ان لاتفصل لأي تيار حمل .

الحماية الوحدية : هي تلك المنظومة التي تكون بتصميمها الافتراضي ذاتية التمييز . والمنظومات التي لها حماية وحدية يمكن ان يكون لها تنظيمات تيار أقل من تيار الحمل للمنطقة أما منظومات الحماية اللاوحدية التي تستعمل في حالة عطل طور الى طور فيجب ان تكون لها تنظيمات اكبر من اقصى تيار حمل لتلك المنطقة .

الحماية الرئيسية : هي تلك المنظومة التي يتوقع ان تشتغل عموماً عند حدوث عطل داخـلي .

الحماية الساندة : وهي منظومة حماية ثانية (تكون عادة ارخص ، وأبطأ) تقوم بالحماية عندما تفشل منظومة الحماية الرئيسة عن أداء عملها . وتكون ملامسات الافلات لكلا المنظومتين الرئيسية والساندة مربوطة على التوازي . ان الفشل في اظهار وعزل العطل يمكن ان يكون بسبب بعض الاجزاء المشتركة بين المنظومتين (ومثال على ذلك قاطع الدورة) وعليه فان معظم المشاريع تجهز بحماية ساندة لأزالة العطل في قاطع دورة آخر .

الحماية الاختبارية : هي منظومة حماية تكون ملامسات الافلات فيها مربوطة على التوالي مع تلك التي في المنظومة الرئيسية وبذلك تحرس ضد الاغفال في التشغيل في اي من المنظومتين ؛ ومنظومة الحماية الاختبارية هذه تستخدم في الاماكن التي لايمكن ان يسمح فيها لأي سوء تشغيل في اجهزة الحماية ، مثل قضبان التوزيع لمحطة توليد رئيسية .

الحساسية : يقال عن منظومة حماية بأنها حساسة عندما تشتغل لتيار عطل داخلي صغير جداً ، ويحدث هذا عندما ينفصم موصل خط علوي معلق ويقع على ارض جافة أو أسيجة ، فحينئذ يكون تيار العطل صغيراً جداً ، حيث من الصعب عموما تأمين حماية كافية تتحسس التيار وتكشف ظروف هذا العطـــل .

الاستقرارية : يقال عن منظومة حماية ما انها مستقرة عندما لاتعمل عند وجود تيار عطل خارجي كبير . ويجب على المنظومة ان تكون مستقرة لحد بلوغ تيار العطل الاقصى المسموح بمروره خلال المنطقة . والمواصفات النموذجية قد تتطلب استقرارية الى حد 20 مرة بقدر التيار الابتدائي المقنن لمحول التيار. ان حد الاستقرارية الاسمية يعطى بدلالة قيمة ج. م. ت لمركبة تيار العطل الخارجي المتماثلة .

ومصطلحا الاستقرارية والحساسية هما تعبيران نسبيان . حيث يمكن لمنظومة حماية ان تكون حساسة جداً ولكنها غير كافية الاستقرار . من الوجهة المثالية يجب ان تكون حساسة جداً ومستقرة جداً(لحدود معقولة)، ولكن عادة ماتكون ظروف تحقيق هاتين الحالتين المثاليتين متضاربه (متضادتين).

الكمية المميزة : هي تلك الكمية التي تميز عمل المرحل (ومثال على ذلك التيار لمرحل التيار المفرط ، والزمن لمرحل مؤخر التوقيت) .

كمية الامداد بالطاقة : هي التيار والفولتية أو اي منهما التي عندما تسلط على مرحل ما تجعله في حالـــة اشتغال

القيمة المقننة : هي قيمة كمية الامداد والمؤشرة على لوحة التسمية والتي يعتمد عليها اسلوب اداء المرحل . وفي حالة المرحل الذي يعمل بالتيار ، فان تياره المقنن يكون اعتيادياً التيار المقنن للثانوي في محول التيار الذي يستعمل مع المرحل (وهذا يعني أما 1 أمبير أو 5 أمبيـــر) .

قيمة التنظيم : وهي القيمة او القيم الاسمية المؤشرة على مزولة المرحل (وتكون عادة نسبة مئوية من القيمة المقننة) التي يصمم المرحل للاشتغال عندها (مثال على ذلك 40 % من ٥ أمبير) . ولما كان مرحل الحماية ومحول التيار التابع له لايمكن النظر في أي منهما بمعزل عن الآخر ، فان تنظيم منظومة الحماية غالباً مايؤشر على أنه نسبة من التيار المقنن لابتدائي محول التيار نفسه . ان منظومة القدرة يجب ان تكون مصممة وعاملة بحيث ان تيار العطل الأدنى الذي يحدث في اي منطقة يكون في الاقل ضعف تنظيم الحماية في تلك المنطقة . لبعض المرحلات (التي تعمل لدخل ثابت من الفولت أمبير في جميع تنظيمات التيار ومثال على ذلك مرحلات I.D.M.T.L) فان أقل تنظيم لتيار المرحل يناظر أقصى قيمة لمانعة المرحل نفسه وهذه المحاثة هي العبء على ثانوي محول التيار . وعليه فان تنظيم تيار المرحل الادنى قد يسبب في تشبع محول التيار . لذلك فليس من الضروري ان ينتج تنظيم تيار المرحل الادنى اقل تنظيم لتيار العطل بدلالة التيار الابتدائي لمحول التيار نفسه .

قيمة اللقط (الاشتغال) : هي أقل قيمة ممكنة لكمية الامداد التي تكون كافية لجعل المرحل يلتقط (اي يغلق ملامساته) . ولمرحل مثالي فان قيمة اللقط وقيمة التنظيم تكونان متساويتيـــــن .

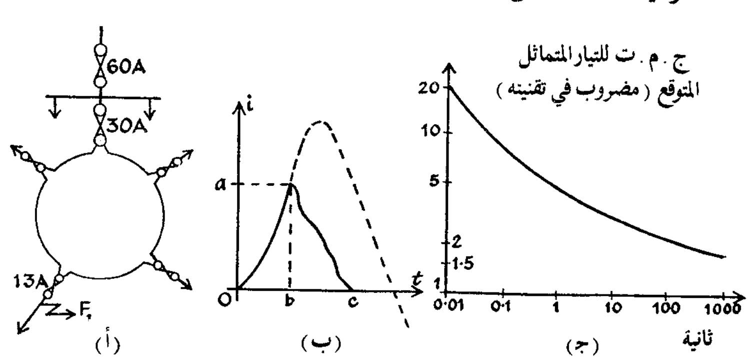
زمن التشغيل : هو الزمن الذي بين وضع قيمة معينة للكمية المميزة (5 أمثال التنظيم مثلاً) واشتغال المرحـــل نفسه .

قيمة اعادة التنظيم (الاسقاط) : هي اعلى قيمة لكمية الامداد التي تكون على حد الكفاية لابقاء ملامسات المرحل مغلقة بعد حصول عملية التشغيل . والمرحل الجيد هو الذي له نسبة اسقاط / اللقط أقل جزئياً من الواحد (وكذلك زمن اعادة تنظيم صغير عندما تزداد كميـــة الامـداد) .

9.4 منظومات الحماية (المنظومات الحمائية) ذات التدرج الزمني (اللاوحدية) . Time-graded (Non-unit) Protective Systems

ان منظومات الحماية ذات التدرج الزمني (اللاوحدّوية) تتألف من أجهزة حماية متعددة . وكل جهاز منصوب في نقطة معينة وفي فترات على مسار منظومة قدرة اشعاعية . وان هذه الاجهزة غير مربوطة فيما بينها كهربائياً . فاذا حدث عطل على منظومة القدرة فان كل جهاز من هذه الاجهزة سوف يحمل التيار نفسه . ولكن المعضلة هي في الحصول على تمييز صحيح بين هذه الاجهزة . يكون الحل بضبط ازمان اشتغالها (تدرج الزمن) بحيث ان الجهاز الاقرب لمكان العطل والمربوط على جانب مصدر الطاقة منه . يزيل العطل قبل اشتغال اي من الاجهزة الباقية . ان منظومات الحماية المتدرجة الزمن تستخدم كثيراً في منظومات التوزيع للضغط المنخفض 415 / 240 فولت على شكل مصاهر وقواطع دورة صغيرة M.C.B .

قد تستخدم المصاهر لفولتيات قد تصل الى حد ١١ ك. ف . اما المرحلات متدرجة– الزمن الحثية فتستخدم بصورة رئيسية لحماية منظومات ١١ ك. ف . وتستعمل ايضا حماية ساندةً لفولتيـــات أعـلى .



الشكل 9.3. المصاهر.

9.4.1 المصاهـر FUSES

يبين الشكل 9.3 (أ) دائرة حلقة نموذجية بفولتية 240-V وتيار 13-A . اذا حدث عطل ما في النقطة F_1 من الحلقة فأن التمييز الصحيح يمكن الحصول عليه اذا ازال المصهر ذو 13-A العطل قبل انصهار المصهر ذي 30 أمبير ويوضح الشكل 9.3 (ب) الجزء الأول الكبير من منحني تيار العطل (أنظر الشكل 7.9) . ان التيار المتوقع (المبين بالخطوط المنقطة) هو التيار الذي يمر في حالة عدم وجود المصهر في الدائرة : ويقاس عادة بدلالة قيمة ج . م . ت مركبة التيار المتناوب (المتماثلة) . التيار الذي ينصهر عنده عنصر المصهر يسمى تيار القطع (*oa*) ويقاس هذا بوصفه كمية لحظية . عليه فأنه من الممكن للتيار المتوقع ان يكون رقمياً أقل من تيار القطع . ويدعى (*ob*) بزمن ماقبل الشرارة . أما (*bc*) فهوزمن التفريغ الشراري و(*oc*) هوزمن التشغيل الكلي .

ان التيار المقنن لمصهر ما (وليكن 13 A) هو التيار الذي يستطيع حمله ذلك المصهر لفترة غير محدودة بدون ان ينصهر. وتيار الأنصهار الأدنى هو أقل تيار ممكن مقدراً بقيمة ج . م . ت الذي عنده ينصهر المصهر. وعامل الأنصهار هو النسبة التي بين أقل تيار انصهار والتيار المقنن . الشكل 9.3 (ج) يوضح خواص نموذجية للزمن مع التيار لمصهر مصمم للعمل بـ 11 ك . ف . وتدرج مقياس التيار هنا يكون بمضاعفات التيار المقنن (= 1) . في الحياة العملية يعطى هذا المخطط بدلالة زمن ماقبل الشرارة والتيار المتوقع سوية مع معلومات تنسب زمن الشرارة الى التيار وتيار القطع الى التيار المتوقع . للتيارات الصغيرة (الأحمال المفرطة) يكون زمن الشرارة أقل بكثير من زمن ماقبل الشرارة ولكن العكس هو الصحيح للتيارات الكبيرة (في حالة قصر الدائرة) .

للحصول على تمييز بين مصهرين متجاورين يحملان التيار نفسه ، يجب ان يزيد زمن ماقبل الشرارة للمصهر الرئيسي (الأقرب الى المصدر) على زمن الأشتغال الكلي للمصهر الفرعي . في مدى التيار بين التيار الأسمي وتيار الصهر الأدنى لايعطي المصهر أية حمايه تذكر ولكن الحرارة الكبيرة والمتزايدة قد تسبب تدهورا في خواص المصهر. ان الكلفة الأبتدائية للمصهر تكون قليلة ولكن نصبه وادامته (ضد التدهور والتآكل) وعملية الأستبدال (بصورة دورية أو بعد عطبه) قد تكون غالية بمكان (ومثال على ذلك شبكات 11 ك . ف البعيدة كتلك المستخدمة في القرى والأرياف) .

ان المصهر هو عبارة عن تشكيلة من جهاز حماية وقاطع دورة . وأن خواصه المتمثلة بالتيار / الزمن تكون بالتقريب ثابتة أي أن (ثابت = I^2t) للتيارات الكبيرة وعليه فأن زمن تشغيله يكون صغيراً جداً (جزء من دورة كاملة للتردد) . لذلك فأن تدرج الزمن للمصاهر مع أجهزه الحماية الأخرى يكون مسألة غير بسيطة .

9.4.2 المرحلات الحثية ذات ميزات التأخر الزمني العكسي الادنى المحدد .

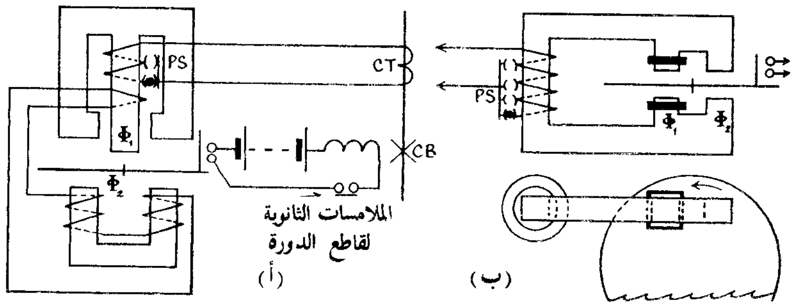
INVERSE DEFINITE MINIMUM TIME LAG INDUCTION RELAYS (I.D.M.T.L.)

ان هذه المنظومة ذات الزمن المتدرج تستخدم لحماية منظومات التوزيع لفولتية 11 ك . ف . وسوف تناقش على فرض ان القاريء قد درس مباديء الجهاز الحثي (أو المرحل) . (ان كتب دراسية كثيرة تغطي هذا الموضوع . وهنا يشار على القاريء مراجعة الكتاب المؤلف من قبل وارنكتن Warrington وشوتر Shotter حيث فيه تفصيل واف عنها) . الخلاصة التالية ستكون كافية من أجل بلوغ غرضنا الحاضر . ان الشكل 9.4 (أ) يوضح تركيب مرحل حثي واطمتري wattmetric حيث يشبه في تركيبه مقياس الطاقة الكهربائية (kWh) الكيلواط – ساعة الا أن المغناطيس السفلي يمد بالطاقة ، بوساطة التقارن المتبادل من المغناطيس العلوي . أما النوع ذو القطب المظلل shaded pole فموضح في الشكل 9.4 (ب) . ويلاحظ هنا ان ملامسات الأفلات مبينة تخطيطياً ولكن في الحقيقة توضع التوصيلات المتحركة على عمود دوران المرحل نفسه .

المبدأ الأساسي للمرحل الحثي هو أن قرصه المعدني (سواء كان من نحاس أو المنيوم) يقطعه فيضان متناوبان لهما طوران مختلفان . وهذان الفيضان يحثان تيارات دوامة في القرص . وكل فيض منهما يتفاعل مع التيارات الدوامة للفيض الآخر لتوليد عزوم تعمل بدورها على تدوير القرص . عزم السوق (التدوير) معطى بالمعادلة التالية (بفرض اهمال التشبع في المغناطيس الكهربائي للمرحل)

$$\text{العزم} = KfI^2 \sin\theta \cos\lambda \qquad [9.8]$$

حيث ان I هو تيار المرحل ، و θ هي الزاوية بين الفيضين (يتقدم Φ_2 على Φ_1 بزاوية حوالي $60°$) . وان $\cos\lambda$ هو عامل القدرة لدائرة التيار الدوّام في القرص (وتكون قيمته واحداً بالتقريب) . مما يجب ملاحظته هنا هو اعتماد العزم بصورة مباشرة على التردد f .



الشكل 9.4 : المرحل الحثي (تنظيم المأخذ = PS)
(أ) النوع الواط متري (أو اللف المزدوج) (ب) النوع ذو القطب المظلل

ان اشتغال المرحل يتطلب كمية معينة من الفيض والتيار – لفات . وتنظيمات التيار للمرحل تختار بوساطة تغيير عدد اللفات لملف الاثارة الذي تحت التشغيل (ويتم ذلك بوساطة المأخذ .P.S الموضح في الشكل 9.4) : وعلى سبيل المثال فلمرحل عطل ارضي ذي تيار مقنن قدرة 5 A فان تيارا مقداره 1 A في الملف كله او 2 A في نصف الملف او 4 A في ربع الملف سوف ينشيء الفيض والعزم والامبير – لفات وكذلك زمن التشغيل (مع الاخذ بنظر الاعتبار جودة التصميم) أنفسها . لذلك فان منحني ضبط واحد فقط يعطى ويطبق هذا على جميع التنظيمات الاخرى . ان تنظيم المأخذ (.P.S) يمكن اعطاؤه مباشرة بوحدات التيار (الامبير) او بصورة غير مباشرة بوصفها نسبة مئوية من التيار المقنن . والتنظيمات النموذجية لمرحل عطل ارضي هي من 20 الى 80 % بتدرج 10 % ولمرحل تيار مفرط (مرحل عطل طورٍ الى طور) هي من 50 الى 200 % بتدرج 25% .

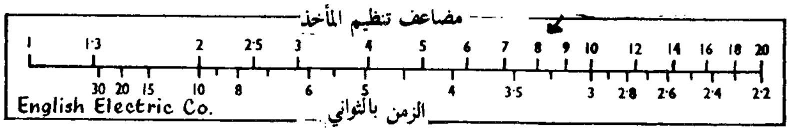
ان التيار الحقيقي للمرحل مقدرا بقيمة ج . م . ت ، وممثلا بمضاعفات تيار التنظيم يدعى بـ « مضاعف تنظيم المأخذ » (.P.S.M) : فمثلا اذا نظم مرحل تيار مفرط (تياره المقنن 5 A) عند 200% تساوي 10 A واذا كان تيار المرحل 150 A فعليه يجب ان يكون مضاعف تنظيم المأخذ مساوياً 15 ، واذا كان محول التيار مقدراً بـ 400/5 A ، فان تيار العطل يكون 12 kA . ان تيار مرحل معلوم يولد عزم تدوير من شأنه ان يعجل القرص الى سرعة ما بحيث ان المغناطيسي الدائم الكابح (لم يبين هنا في الشكل 9.4) يولد عزما كابحا يكون اقل بقليل من عزم التدوير . والفرق بين هذين العزمين هو العزم اللازم للتغلب على الاحتكاك ونابض اعادة الضبط للمرحل . ان الفرق بين اقل تيار لازم لجعل القرص يبدأ بالدوران وبين تيار الألتقاط يجب ان يكون قليلاً (حوالي 5 % من التنظيم) . والمرحل الجيد هو الذي يمتلك عزماً مدوراً كبيراً . وعزماً كابحاً كبيراً ويجب

ان يكون الاحتكاك اقل مايمكن : وكذلك القرص يجب ان يكون خفيفا لكي تكون فترة التعجيل الابتدائي صغيرة بحيث يمكن اهمالها وهذا القرص يجب ان يدور بسرعة ثابتة (عند مرور تيار معين) . عليه فان الزمن اللازم لتشغيل المرحل يتناسب طرديا مع زاوية الانتقال . ان عزم التدوير الكبير يعطي ضغطا جيدا على ملامسات الافلات . وعندما تغلق هذه الملامسات تحت هذا الضغط فان حدوث الشرارة يكون اقل مايمكن . عند ازالة العطل بوساطة قاطع الدورة فان نابض اعادة الضبط يقوم بارجاع القرص الى موضعه الاصلي لكي لايبقى بوضع وقوف خلفي . ان عزم الكبح العالي يعطي زمن تجاوز الحد صغير over-shoot time (وهذا الزمن هو الزمن الذي يستمر فيه القرص بالدوران بعد رفع عزم التدوير عنه) ولكن يعطي زمن اعادة ضبط اطول والذي خلاله سيكون توقيت المرحل غير صحيح اذا ماحصل عطل آخر .

ان منظم الزمن للمرحل المؤشر من 0 الى 1 والذي يدعى بمضاعف الزمن (T.M.) يضبط موضع التوقف الخلفي المتحرك . عندما يكون مضاعف الزمن موضوعاً على الرقم 1 فان موضع التوقف – الخلفي يكون ابعد مايمكن الى الخلف بينما اذا كان مضاعف الزمن موضوعا على الصفر فان التوقف الخلفي يكون بوضع بحيث تكون ملامسات المرحل مقفولة تقريباً . ان مضاعف الزمن يكون بالتقريب متناسباً جداً مع زاوية انتقال ملامسات المرحلات . ولكنه يضبط بحيث يعطي سماحاً للتعجيل الابتدائي ونابض اعادة الضبط ان اقل قيمة عملية لتنظيمه هي حوالي 0·1 وأقل من قيمة هذا التنظيم سوف يجعل ملامسات المرحل تغلق صدفة بسبب الاهتزازات او لاية اسباب اخرى .

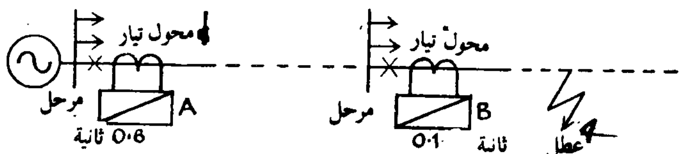
ولمرحلات IrD.M.T.L تعطي المواصفات القياسية البريطانية B.S. 142 العلاقة بين مضاعف تنظيم المأخذ وزمن تشغيل المرحل لمضاعف زمن مقداره 1 هذه المعلومات مبينة في الشكل 9.5 يلاحظ هنا ان العلاقة عكسية الا ان الزمن يبدأ بالنبوت بين P.S.M.= 10 و P.S.M. = 20 (وهذا يعرف بالزمن الادنى المحدود) . P.S.M. = 1 معناه ان تيار المرحل يساوي تيار تنظيمه . من الواضح ان المرحل سوف لايعمل بتيار اقل من قيمة تيار تنظيمه . لكن المصنعين بصورة عامة يجعلون نسبة سماح مقدارها 30 % على تيار الالتقاط بحيث ان المرحل يجب ان يعمل (يلتقط) بين P · S · M = 1 و P.S.M. = 1·3 ويستغرق زمنا يقرب من 30 ثانية لكي يشتغل . ولتجنب الاشتغال في هذه المنطقة القلقة . من المعتاد ان يتم ترتيب الـ P · S · M بحيث يكون (P.S.M. > 2) لاقل تيار عطل ممكن . في حالة مرحلات التيار المفرط فمن الضروري التأكد من ان لتيارات الحمل القصوى يكون P.S.M. < 1 بنطاق

أمين ومعقول . وذلك لان الحماية ليس من شأنها ان تتعامل مع منظومة مفرطة التحميل بصورة وقتية .



الشكل 9.5. مميزات مرحل الـ *I.D.M.T.L*

ان الجزء من المنحني الخاص بالزمن الادنى المحدود يمكن ايجاده لمرحل نوع اللف – المزدوج بوساطة ربط ملف مفاعل مقابل التشبع (ذو قلب حديدي مغلق) عبر المغناطيس السفلي . مغناطيس شكل U . وللمرحلات ذات الاقطاب المظللة . بتقليل مقاطع الحديد بالتدرج ابتداءً من الاقطاب وانتهاءً بملف التشغيل حتى يكون الفيض المتسرب من الملف اكبر مايمكن عند التيارات الـكبيرة . ان الغرض من جزء الزمـــن المحدد الادنى في المنحني سوف يناقش في الفقرة 9.4.3 .



الشكل 9.6. حماية متدرجة الزمن لمغذ شعاعي الازمان المبينة تمثل أزمان اشتغال المرحلات (الزمن الادنى المحدد لمرحلات نوع *I.D.M.T.L.*)

يبين الشكل 9.6 استخدام مرحلات متدرجة الزمن لحماية خط مغذٍ شعاعي . ويلاحظ هنا ان نطاق تدرج الزمن بين المرحلات المتجاورة هو ثانية بوصفه قيمة نموذجيه . عند حدوث عطل يغلق المرحل B ملامسات الافلات بعد مرور 0·1 ثانية من بدء العطل واحتياطي زمن قدره 0·5 ثانية يعطي لقاطع الدورة في B وقتا كافيا لازالة العطل من المنظومة قبل اشتغال المرحل A . اذا ماحدث ان اشتغل المرحل A قبل B لعطل يقع خلف قاطع الدورة للمرحل B . كما موضح في الشكل فان هناك فشل اشتغالي في منظومة الحماية .

ان نصف الثانية الاحتياطي للزمن قد يقسم الى مايلي :

الزمن الـكلي لقاطع الدورة ، 0·12 ثانية

خطأ المرحل ، 0·1 ثانية لـكل منهما (A سريع ، B بطيء) ، هو 0·2 ثانية
نطاق الأمان ، 0·1 ثانية
الـكلي 0·42 ثانية

باستخدام قواطع الدورة السريعة الحديثة وكذلك باستعمال مرحلات حديثة مضبوطة فانه من الممكن تقليل زمن التدرج الـكلـي الى 0·4 ثانية .

ويمكن الحصول على نطاق نصف الثانية الاحتياطـي للزمن بوساطة اختيار ملائم لما يلي :

1 . تيار الابتدائـي المقنن لمحول التيار
2 . تنظيم المأخذ ، وهذا يؤثر على تدقيق الـ .P.S.M حيث ان
(أ) للحمل الأقصى يكون P.S.M اصغر من 1 (لمرحلات التيار المفرط فقط)
(ب) لتيار عطل أقل مايمكن يكون الـ P.S.M أكبر من 2 (اعظم ممانعة للمصدر مع كون العطل حادثاً في النهاية البعيدة للجزء المجاور) .
3 . مضاعف الزمن (T.M) = زمن الاشتغال الحقيقـي / الزمن.مـن الشكل 9.5 :
(أ) ان أبعد مرحل يكون تنظيمة T.M. ≮0·1
(ب) ولاقصـى تيار عطل لعطل حدث مباشر خلف محول تيار لأبعد مرحـل ينظم الـ T.M للمرحل التالـي بحيث يعطـي نطاق تدرج زمن مقداره 0·5 ثانية .

وتتكرر هذه العملية لـكل زوج من المرحلات . لجميع تيارات العطل التـي تكون قيمها اقل من القيمة العظمـى لهذا التيار فان تنظيم مضاعفات المأخذ تقلل . وبما ان شكل منحنـى الزمن يتناقص عكسياً (الشكل 9.5) فان الفترات الزمنية بين المرحلات يجب زيادتها:ولما كان كل جهاز في منظومة قدرة له قابلية مقننة لتحمل تيار العطل خلال زمن قصير جداً (I kA في زمن مقداره t ثانية) . فعليه من الضروري التأكد من اختيار التنظيم الوارد اعلاه وذلك باستخراج قيمة I^2t لاقصـى تيار عطل بحيث يكون اقل من I^2t المحسوبة لبيانات الزمن القصير المعطاة بالنسبة للمرحل .

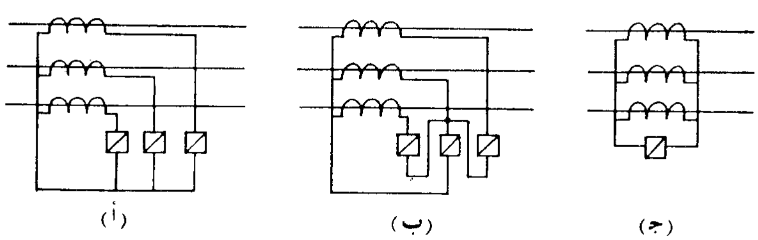
ان المرحل نوع I.D.M.T.L الذي له خواص زمنية مبينة في الشكل 9.5 هو النوع الذي يستخدم اعتياديا في حماية منظومات القدرة . ان خواصه الزمنيـة لايمكن التعبير عنها بمعادلة رياضية سهلة . ولـكن يمكن تصميم المرحلات بصورة

عامة بحيث تمتلك خواص زمنية بصيغة التيار × الزمن = ثابتاً . او (التيار)^2 × الزمن = ثابتا : وتستخدم هذه المرحلات الأخيرة عندما يراد بها الحماية ضد الحرارة المفرطة (بدلاً من استخدامها للحماية ضد التيار المفرط) . ان الخواص الزمنية العامة يمكن كتابتها بصيغة $I^n t$ = ثابتاً . وفي المرحلاّت الستاتيكية (الالكترونية) قد يصل العدد n الى حوالي 8 (انظر المصدر Warrington 1962) . مثل هذه المرحلاّت لها تطبيقات متخصصة جداً .

تحمى منظومات القدرة الثلاثية الطور بثلاث محولات تيار مربوطة بشكل نجمي . وكذلك ثلاثة مرحلات نوع I.D.M.T.L تكون دوائر الافلات فيها مربوطة على التوازي . ويمكن ترتيبها كثلاث مرحلات للتيار المفرط كما في الشكل 9.7 (أ) أو مرحلي تيار مفرط ومرحلاً ضد عطل أرضي كما في (ب) من الشكل نفسه .

في الشكل 9.5 (أ) يجب تنظيم جميع المرحلات فوق تيار الحمل الاعظم وعليه يجب ان يكون تيار العطل الادنى أكبر من تيار الحمل الاعظم هذا .

لاعطال أرضية والاعطال من نوع طور الى طور يكون العبء على كل محول تيار هو المرحل الخاص به يضاف اليه توصيلات الثانوي . ولما كانت التنظيمات عالية فان الأعباء الاومية سوف تكون قليلة (وذلك لكون المرحلات من نوع I.D.M.T.L تعمل بدخل ثابت من الفولت امبير بالتقريب في جميع تنظيماتها) .



الشكل 9.7. (أ) ثلاثة مرحلات للتيار المفرط (ب) مرحلان للتيار المفرط وواحدة لعطل أرضي (جـ) مرحل استبقائي الربط (لعطل أرضي فقط)

في الشكل 9.7 (ب) يكون المر حل الاوسط خاصا بعطل أرضي وذلك لانـــه يستطيع تحسس تيار التتابع الصفري فقط (انظر الفصل الثامن) . خلال الظروف الاعتيادية والمتوازنة فان هذا المرحل لايحمل اي تيار ولذلك فان تنظيمه قد يأخذ أية قيمة كانت اكبر من الصفر . وعمليا فان هذا التنظيم يكون بحدود 10% . ان هذه الدائرة تستخـــدم عندما يكون تيار العطل الارضي اقل من تيار الحمل الاعظم . خلال العطل الارضـــي يكون العبء على محول التيار الفعال متألفاً من مرحل تيار مفرط ومرحل العطل الأرضي مربوطين على التوالي . واذا كان تنظيم مرحل العطل الارضي قليلا فان مقاومة ممانعته قد تكون من الكبر بحيث ان العبء الكلي على محول التيار يتسبب في تشبعه . لذلك اذا كان من الضروري استعمال ربط مرحلي تيار مفرط ومرحل واحد لعطل الارض فان محول التيار يجب ان يمتلك فولتيات نقطة الانحناء (الركبة) عالية بحيث تكون كافية لضمان عمل المرحلات تحت عموم ظروف العطل . واذا ربطت محولات التيار الثلاثة على التوازي (ويشار اليه هنا بالربط الاستبقائي) عبر مرحل واحد . (انظر الشكل 9.7 (ج)) فان هذا المرحل سوف يتحسس تيارات عطل ارضي فقط .

مثـــال محلول *9.1*

محول قدرة 20-MVA . معرض للاشتغال بحمل مفرط بنسبة 30 % . يغذي قضبان توزيع فولتيتها 11ك . ف خلال قاطع دورة . وتوجد قواطع دورة اخرى تجهـــز ـ مغذيات خارجة من هذه القضبان . قاطع دورة المحول مجهز بمحولات تيار نسبة 1000/5 أمبير . اما قواطع دورة المغذيات فمجهزة بمحولات تيار نسبة 400/5 A وجميع طواقم محولات التيار هذه تغذي مرحلات تيار مفرط من النوع الحثي . المرحلات على قواطع دورة المغذيات لها تنظيم مأخذ مقداره 125 % وكذلك تنظيم زمن قدره 0·3 . اذا مر تيار عطل ثلاثي الطور مقداره 5000 A من المحول الى احد المغذيات . فأوجد زمن اشتغال مرحل المغذي وكذلك التنظيم الادنى للمأخذ لمرحل المحول وتنظيم زمنه . افرض نطاقا لزمن التمييز مقداره 0·5 ثانية ..

(I.E.E.)

الحل : المغذي

تيار الثانوي $= 5000(5/400) = 62{\cdot}5$ A

مضاعف تنظيم المأخذ $= 62{\cdot}5/(1{\cdot}25 \times 5) = 10$

الزمن من الشكل 9·5 $= 3$ sec ثانية

زمن الاشتغال $= 0{\cdot}3 \times 3 = 0{\cdot}9$ sec.

المحول

التيارالمفرط $= (1{\cdot}3 \times 20) \times 10^3/(\sqrt{3} \times 11) = 1360$ A

تيارالثانوي $= 1360(5/1000) = 6{\cdot}81$ A

مضاعفتنظيمالمأخذ $= 6{\cdot}81/(\mathrm{PS} \times 5)$

حيث ان PS تعني تنظيم المأخذ . وحيث ان مرحل المحول يجب ان لايعمل لتيار الحمل المفرط . عليه يجب ان يكون مضاعف تنظيم المأخذ (PSM) له اقل من 1 . وعليه فان تنظيم المأخذ (PS)> $6{\cdot}81/5 > 1{\cdot}36$ او 136 % . لـكن تنظيم المأخذ هذا يحدد بوساطة قيم قياسية بفترات مقدارها 25 % وعليه فان اقرب قيمة تكون 150 % .

تيار العطل الثانوي $= 5000(5/1000) = 25$ A

مضاعف تنظيم المأخذ $= 25/(1{\cdot}5 \times 5) = 3{\cdot}33$

الزمن من الشكل 9.5 $= 5{\cdot}7$ ثانية

تنظيم الزمن $= (0{\cdot}9 + 0{\cdot}5)/5{\cdot}7 = 0{\cdot}246$

9.4.3 مرحلات الزمن المحدد DEFINITE-TIME RELAYS

ان منظومات الحماية المتدرجة الزمنذات الزمن المحدد هي تلك المنظومات التي لها مرحل اذا اشتغل لتيار عطل . فانهُ يبدأ تشغيل مرحل توقيت يعمل على افلات قاطع الدورة بعد فترة زمنية مضبوطة مقدماً . وهذه الفترة الزمنية لاتعتمد على تيار العطل نفسه . أما التمييز فيمكن الحصول عليه بوساطة تدرج زمن المرحلات . لذلك فان عطلاً في نهاية المغذي القريبة من المصدر يترك على المنظومة ولأطول وقت . بغض النظر عن مقدار تيار العطل .

بالاشارة الى الشكل 9.6 . اذا كانت **E** هي ق . د . ك للمصدر وكانت $\mathbf{Z}_S$ هي ممانعة المصدر الى حد قضيب التوزيع A . و $\mathbf{Z}_F$ هي ممانعة المغذي من النقطة A الى مكان العطل . عليه فان تيار العطل يكون $\mathbf{I} = \mathbf{E}/(\mathbf{Z}_S + \mathbf{Z}_F)$. واذا كانت $\mathbf{Z}_S$ صغيرة (مصدر بمستوى عطل عالي) فان تيار العطل يزداد كلما تحركت نقطة العطـل باتجاه A . وهذه تنطبق بصورة خاصة على عطل ارض يتغذى من محول يكون الثانوي

فيه مؤرضاً بصورة وثيقة . تحت هذه الظروف فانه من المستحب استخدام مرحل ذي زمن عكسي لازالة العطل . وخاصة العطل القريب من نهاية المصدر لـكل جزء . بصورة أسـرع من المرحل ذي الزمن المحدد المناظر .

اذا كانت Z_S كبيرة (اوانه في حالة اعطال الارض . اذا كان محول المصدر مؤرضا عن طريق مقاومة) فان تيار العطل يميل الى ان يكون ثابتا ولايعتمد على موضع العطـل . لذلك فان جميع المرحلات في منظومة الزمن – العكسي سوف تعمل عند نقاط ثابتـة على المنحنى الذي يبين العلاقة بين الزمن ومضاعف تنظيم المأخذ لجميع مواضع العطل : وعليه ستكون فعلاً منظومة زمن محدد . ولما كانت مرحلات الزمن – المحدد اعتياديـاً رخيصة الثمن . فانه من الفائدة الاقتصادية ان تستعمل بدلا مـن الانـواع الاخـرى .

وفي منظومات القدرة ـ الكبيرة والمتكاملة تكون ممانعة المصدر معرضة للتغير عـلى مديات كبيرة . لذلك فان المميزات نوع I.D.M.T.L تكون لها بعض الفوائد هنا . حيث تكون معكوسة لمضاعفات تنظيم الماخذ للقيم من 2 الى حوالي 10 وذات زمن محدد لتلك التي قيمها اعلى من 10 بالتقريب .

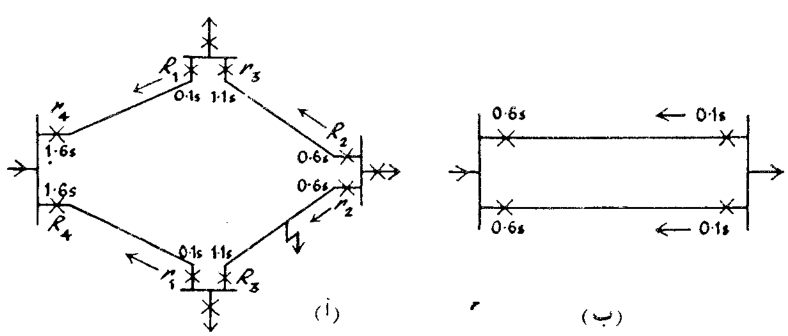
9.4.4 المغذيات الحلقية : المرحلات الاتجاهية .

RING FEEDERS: DIRECTIONAL RELAYS

ان المغذيات الشعاعية واجهزةحمايتها تكون بسيطة وقليلة التكاليف اذا ماقورنـت بالمغذيات الحلقية . ولـكن اذا ماحدث عطل في مغذ شعاعي . فان جميع المستهلكين الـكائنين خلف العطل سوف يخسرون استمرار تجهيز الطاقة . الشكل 9.8 (أ) يبين مغذيا حلقيا . ففي هذه الحالة يكون لـكل محطة ثانوية مغذيان داخلان اليها ويتم تصميم المنظومة بحيث اذا تعرض اي مقطع من القابلو الرئيسي للعطل . فان القابلوات الباقية يمكن لها ان تجهز الاحمال كلها (ويشار الى هذا بانه مصدر تجهيز قوي) . لـكن كلفة الانشاء لمثل هذه المنظومة تكون عالية اذا ماقورنت بمنظومة تحتوي على مغذيين شعاعييـــن منفصلين . وذلك لان منظومة الحلقة تتطلب استخدام ضعف العدد من قواطع الـدورة وكذلك اجهزة حماية غالية التكاليف . عليه فان المنظومات الحلقية يفضل استخدامها لتجهيز الاحمال الـكبيرة التي تنتج ارباحاً جيدة . وحيث يتطلب تجهيز الحمل باستمرار

لتفادي تعريفة الجزاء الحاصلة عن انقطاع التيار . وتستخدم ايضا في الاماكن التي تكون حياة الاشخاص فيها عرضة للخطر في حالة انقطاع التجهيز كالمناجم والمستشفيات .

ان ازمان المرحل تضبط بحين يؤخذ الاتجاه حول منظومة الحلقة بنظر الاعتبـــار وان كل اتجاه للمنظومة يعامل على انه مغذ شعاعي منفصل . اذا كانت جميع المرحلات اعتيادية (غير اتجاهية) واذا افترض وقوع عطل بين المرحلين R_3 و r_2 فان المرحلين R_1 و r_1 سوف يشتغلان (اشتغالا فاشلا) . وعليه فان R_1 و r_1 يجب اعاقتهما عـن العمل (يمنعان عن الاشتغال) بوساطة سيطرة اتجاهية بحيث انهما يعملان لمرور تيار عطل باتجاه السهم فقط . وبوضع عطل معين في كل جزء من المنظومة بصورة متتابعة . فـان القاعدة التالية بالنسبة للسيطرة الاتجاهية يجب تحقيقها : ان السيطرة على الاتجــــاه مطلوب عند كل محطة ثانوية للحمل بوساطة المرحل ذي التنظيم الزمني القليل (اوكليهما اذا كانا متساويين). ان كل مرحل اتجاهي يجب ان يعمل فقط عندما يمر تيار العطل في القطاع الخاص به .



الشكل 9.8 (أ) مغذ حلقي (ب) مغذ مزدوج . الازمان المبينة هي ازمان اشتغال المرحلات .

ان منظومة الخط المزدوج المبينة في الشكل 9.8 (ب) هي حالة خاصة من منظومة حلقية . عليه تطبق عليها القاعدة السالفة نفسها . اذا كان من الضروري القيام بتدريج زمن المغذيات المزدوجة مع اجزاء المنظومة الأخرى . فيجب في هذه الحالة تحوير أو تعديل قيم الأزمان المبينة في الشكل (ب) .

لمرحل التيار المفرط يمكن الحصول على السيطرة على الأتجاه باستخدام مرحل واطمتري . وهذا يشابه بالتركيب والربط مقياس الطاقة kWh المعروف . في هذه الحالة يدور القرص باتجاه واحد عندما تكون الزاوية بين الفولتية والتيار المسلطين على المرحل

أقل من 90° درجة . ويدور بالأتجاه المعاكس عندما تزيد الزاوية عن 90 درجة . يشار الى الفولتية هنا بأنها كمية الأستقطاب وذلك لأن المرحل سيقرر فيما اذا كانت هناك مركبة للتيار في طور هذه الفولتية نفسه أو بضدطورها . تربط التوصيلات بأسلوب بحيث ان كل مرحل اتجاهي يغلق ملامساته (يشتغل) عندما يكون اتجاه انسياب القدرة من قضيب التوزيع الى الجزء المحمي بوساطة هذا المرحل . وتكون ملامسات المرحل الأتجاهي قريبة من بعضها بحيث أنها تعمل خلال زمن حوالي 0·1 ثانية . هذا الزمن يجب ان يؤخذ بنظر الأعتبار عند احتساب تدرج الزمن وانطقة التمييز. ان المرحل الأتجاهي يكون مصمماً بصورة خاصة لكي يضمن حساسيته لتيار عطل ضئيل بعامل قدرة واطيء وفولتية واطئة (عندما يكون العطل قريباً من محول الفولتية) . وهذا من الممكن ان يأخذ صيغة اقتران متبادل بين مغناطيسين كهربائيين .

جوهرياً يجب ان تكون الفولتية والتيار غير متعامدين في المرحل الأتجاهي وبخلافه فأن السيطرة على الأتجاه تكون فاشلة . تعرف الزاوية المميزة للمرحل على أنها تلك الزاوية التي تكون بين الفولتية والتيار عند طرف المرحل والتي يصبح المرحل عندها حساس الى درجة كبيرة (أي يولد عزماً أعظم) . ولمرحل واطمتري اعتيادي احادي الطور فأن هذه الزاوية تكون 0° (ولكن الزوايا الأخرى يمكن الحصول على قيمها) . أما زاوية الربط للمرحل فتعرف بانها الزاوية الكائنة بين الفولتية والتيار المغذيين للمرحل نفسه على فرض أن التيار له طور الفولتية نفسه على جهة الأبتدائي لمحولات الفولتية V.T المربوطة على شكل (نجمي / نجمي) ومحولات التيار C.T.S المربوطة على شكل (نجمي) . وعموماً تكون زاوية الربط 30° والزاوية المميزة 60° ملائمة لحماية المغذيات من التيار المفرط . وعليه فان المرحل الأتجاهي يجهز بفولتية V_{RB} وتيار I_R (الزاوية بينهما تكون 30° عندما يكون التيار I_R بعامل قدرة مقداره واحد بالنسبة الى الفولتية V_{RN}) عليه سيكون المرحل أكثر حساسية عندما يكون عامل القدرة لدائرة العطل 0·866 متأخراً ويفشل المرحل عن العمل اذا كان عامل قدرة العطل 0·5 متقدماً . اذا كان عامل قدرة العطل صفراً ومتأخراً ، فأن عامل القدرة عند المرحل يكون 0·5 متأخراً . وللحصول على زاوية ربط مقدارها 90° فأن المرحل يجب ان يجهز بالفولتية V_{YB} وتيار I_R .

عندما يستخدم مرحل واطمتري للتيار المفرط مع مرحل اتجاهي واطمتري ، فأن ملامسات الأخير يجب ان تربط على التوالي مع الدائرة التي تقرن المغناطيس الذي على

شكل حرف U مع المغناطيس على شكل حرف E في المرحل الأول (أنظر الشكل 9.4 (أ)) . للحصول على سيطرة اتجاهية لمرحل تيار مفرط ذي قطب مظلل (الشكل 9.4 ب) فأن نقاط الملامسات للمرحل الأتجاهي تربط على التوالي مع ملف التظليل (والذي يكون في هذه الحالة ملفاً ملفوفاً) . ولايسمح لأي نوع من مرحلات التيار المفرط بالأشتغال الا بعد اشتغال المرحل الأتجاهي أولاً . ويفضل هذا على ربط مجموعتي نقاط الملامسات على التوالي في دائرة الأفلات لقاطع الدورة .

لمرحلات العطل الارضـي يتم الحصول على التيار من محولات التيار ذات الربط الاستبقائـي (الثلاث المربوطة على التوازي) . كمية الاستقطاب لمرحل اتجاهـي تكون اعتيادياً الفولتية الخارجة من ملف الثالثـي لمحول الفولتية V.T المربوط على شكل مثلث مفتوح . ومحول الفولتية هذا يجب ان يكون ذا ملفاً ابتدائياً نجمي الربط ومؤرضا . أما تركيبه فيكون خماسـي الفرع (انظر الفقرة 6.8 والفقرة 6.10) . بسبب التعقيدات التـي تم ذكرها في اعلاه فان منظومات التوزيع ذات فولتية 11ك. ف.لا تعمل منظومات حلقية اعتيادياً . وفـي بعض الاحيان تستخدم منظومة الحلقة لهـذه الفولتية ولـكن يفتح احد قواطع الدورة وتسمـى حينئذ بمنظومة الحلقة المفتوحـة . اما منظومة الحلقة المغلقة فتعمل عند فولتية 33 ك . ف فاكثر وعليه تستخدم منظومات الحماية الوحدية لهذا الغرض (انظر الفقرة 9.5) .

9.5 منظومات الحماية الوحدية Unit Protective Systems

ان المنظومات اللاوحدية التي تمت مناقشتها لحد الان تميز العطل وفقاً لتدرج الزمن ، وهذه المنظومات تكون بالمقارنة بسيطة ورخيصة الثمن ولاتحتاج الى دوائـر للاسلاك المرشدة الطويلة ، ولـكن زمن ازالة العطل لهذه المنظومات يكون بطيئاً عندما تستخدم مع فولتيات 33 kV فاعلى وكذلك للاجهزة والمعدات الغالية الثمن مثل المولدات والمحولات الـكبيرة . وتعرف منظومة الحماية الوحدية بانها تلك المنظومة التـي تحتوي على مجموعتين من محولات التيار وهذه قد تكون متباعدة بمسافـة معينةعن بعضها والتـي تعرف نهاية القطاع المطلوب حمايته (او المنطقة) . وعليه تكون محولات التيار مرتبطة مع بعضها بوساطة اسلاك المرشد للدوائر المتضمنة مرحلات الحماية ، وعليه تكون منظومة الحماية تلقائية التمييز بدون استخدام تدرج الزمن . ان

منظومات الحماية الوحدية تكون لحظية (تعمل بحدود 0.1 ثانية) ولاتعتمد تنظيمات الزمن فيها على تنظيمات الزمن لمنظومات الحماية الاخرى .

المبدأ الاساس للحماية الوحدية (يطلق عليه عادة حماية Merz- Price) هو ان التيارات الداخلة والخارجة من قطاع معين تكون متساوية ومتماثلة (اهمل اي تعقيدات اخرى سنأتـي على مناقشتها لاحقاً) اذا كان هذا القطاع صحيحاً (غير معرض لعطل) . تربط المرحلات لغرض قياس الفرق بين هاتين المجموعتين من التيارات (وعليه يطلق على هذه المنظومات منظومات حماية فرقية طولية أو متوازنة) ، وذلك لأن التيار المار بالمرحل يساوي صفراً عندما يكون القطاع في حالة اشتغال جيدة . ان الحمايـــة الوحدية لا تتحسس تيار الحمل وتيارات العطل الخارجية (الخلالية) واذا ما حدث عطل داخل هذا الجزء او القطاع فان تيار المرحل سوف لايكون صفراً وعليه فان حساسية منظومة الحماية تجعل المرحل في حالة اشتغال .

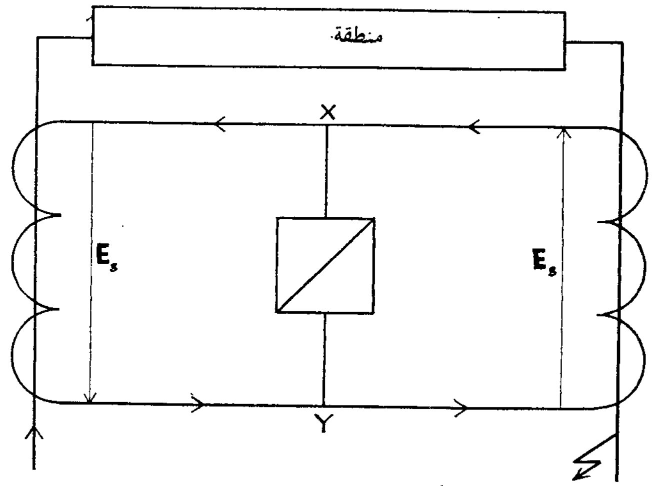
هناك صنفان ثانويان للحماية الفرقية :

(أ) منظومات التيار الدوار ، وتستخدم للمناطق القصيرة (كالمولدات والمحولات ، وقضبان التوزيع) .
(ب) منظومات الفولتية المتوازنة ، وتستخدم للمناطق الطويلة (كالمغذيات ، وخطوط النقل) ، حيث تتحول التيارات الداخلة والخارجة من القطاع الى فولتيات قبل مقارنتها (أو تتوازن مع بعضها) .

9.5.1 منظومات التيار الدوار CIRCULATING-CURRENT SYSTEMS

يبين الشكل 9.9 الدائرة الاساسية لمنظومة التيار الدوار بوصفها مخططاً لطور واحد . بفرض حالة مثالية ، تتساوى التيارات الداخلة والخارجة من المنطقة غير المعرضة لعطل ، ولما كانت محولات التيار متماثلة (متوافقة) والمرحل يكون في المركز الـكهربائـي للــدارة- المرشدة فان التيارات في نصفــي الحلقة المرشدة تكون متماثلة وعليه يكون صفراً لعدم وجود فولتية عبر طرفيه . ان هذه المنظومة تكون غير حساسة لتيار الحمل وتيار العطل الخارجــي (النافذ) . يكون المرحل من نوع المنتج المنجذب .

ان اي اختلاف عن الحالة المثالية هذه سيؤدي الى ظهور فولتية عبر المرحل وبالتالي سيمر تيار خلاله . ان السبب الرئيس في عدم الاستقرارية خلال عطل خارجي هو عدم التماثل



الشكل 9.9 منظومة التيار الدوار

(فقدان التوفيق) بين محولات التيار عندما تحمل تيارات متناوبة كبيرة حاوية على مركبات للتيار المستمر (انظر الشكل 7.9) والاسباب الاخرى لعدم الاستقرارية سيتم التطرق اليها في حينه ضمن هذا الفصل .

هناك طريقتان يمكن استعمالهما لتحسين استقرارية العطل النافذ لمنظومة حمايـة .

(أ) مقاومة الاقرار Stabilising resistor

(ب)المرحلات الانحيازية (المنحازة) Biased relays

اذا حدث في المنطقة عطل داخلي يغذى من نهايتيهافعندئذ تنعكس التيارات الواقعة على جهة اليمين في الشكل 9.9 . ويجتمع تيارا المرشد (ليس من الضروري ان يكونان متساويين ويمران في المرحل . حيث يسبب الاخيرفتح قاطع الدورة . اذا كانـت تغذية المنطقة من جهة واحدة فقط (عرفاً تكون من اليسار) فعليه تكون التيارات في جهة اليمين صفرا ويسري تيار من جهة اليسار فقط في المرحل ليسبب افلات قاطع الدورة . لهـذا السبب وعند مراعاة حساسية منظومة حماية لعطل داخلي يفترض عادة كون التغذية من جهة واحدة . ان محول التيار الايسر والذي يحمل تيار العطل يقال عنه بانه فعال بينما يقال عن محول التيار الايمن بانه معطل عن العمل (idling) . وبما انه خلال عطل داخلي يغذى من جهة واحدة فقط تظهر فولتية عبر المرحل وتكون تقريبا مساوية للفولتية التي تظهر عبر محول التيار المعطل عن العمل . لذلك يأخذ الاخير تيار اثارة صغيـراً .

بما ان العطل الداخلي المغذى من جهة واحدة فقط يمثل اسوأ حالة . فان الطريقة الاعتيادية لدراسة منظومة الحماية الوحدية هي افتراض وقوع اعظم عطل خارجي في المشروع لفحص استقرارية المرحل . وبعدها يتم حذف التيار الايمن لفحص الافلات لعطل داخلي مغذى من جهة واحدة فقط .

مقاومة الاقرار

هذه عبارة عن مقاومة (R) مربوطة على التوالي مع المرحل كما في الشكل 9.9 ولتيار عطل خارجي اقصى . اذا كانت اكبر فولتية (ح . م .ت) (بسبب عدم تماثل محول التيار) عبر X و Y يمكن تخمينها بقيمة معينة V . عليه يكون اختيار المقاومة R بحيث ان $V/(R+R_R)$ اصغر من تنظيم تيار المرحل . حيث ان R_R هي مقاومة المرحل (يمكن معاملتها على انها مقاومة لان محاثة المرحل تكون اقل مايمكن عند تصنيعها في بعض الاحيان باستخدام متسعة توال متولفة tuned .

الطريقة المستخدمة والمختارة عمليا لحساب المقاومة R تكون بفرض احد محولي التيار متشبع كليا بينما يحتفظ الاخر بخاصية التحويل التامة للتيار. وبما ان كلا محولي التيار يكونان اسميا متماثلين ويحملان التيار نفسه في الابتدائي . فان هذا الفرض قد يكون متحفظا بعض الشيء . واشارة الى الدائرة المكافئة لمحول لتيار . الشكل 9.1 (أ) . فان محول التيار المشبع يمثل بدائرة تحتوي على دائرة اثارة توازي ممانعتها صفرا مربوطة على التوالي مع ممانعة تساوي مقاومة الثانوي (وذلك باهمال المفاعلة التسربية وخاصة عندما يكون الابتدائي عبارة عن قضيب كما في محولات التيار ذات القلب الحلقي) . اما محول التيار الاخر فيتم تمثيله بدائرة اثارة مفتوحة ومقاومة توال للملف الثانوي . لذلك فاذا كان I_f هو التيار الاقصى لعطل خارجي على جهة الثانوي . عبر محول التيار التام (الكلي) وكانت r تمثل مقاومة نصف اسلاك الدارة المرشدة وكذلك R_S تمثل مقاومة الثانوي فعليه

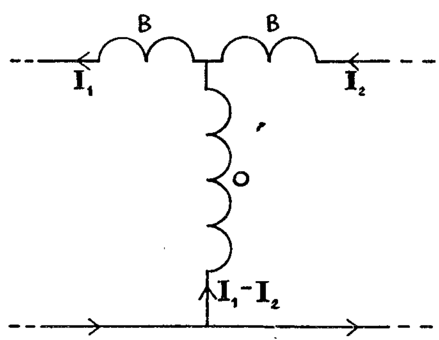
$$V = I_f(R_S+r)$$

وبذلك يكون تنظيم التيار $\geq I_f(R_S+r)/(R+R_R)$

ان طريقة حساب مقاومة الاقرار هذه يمكن ان تبرر بالاسس النظرية المرحلات الحديثة من نوع المنتج المنجذب اللحظي والحاوية على مقاومة استقرار R . لهـا تنظيمات موضحة بالفولت (بدلا من الملي امبيرات) . ان تيار حدود الاستقرارية هو القيمة القصوى (مقدرة بـ ج . م . ت لمركبة التيار المتناوب) لتيار عطل خارجي الذي تبقى عنده

منظومة الحماية مستقرة . عندما نضمن ان المرحل سوف يكون مستقرا عند اقصى تيار عطل خارجي . فمن الضروري آنئذ التأكد من ان المرحل سوف يعمل لاقل تيار عطل داخلي بفرض ان التغذية تكون من جهة واحدة فقط . فاذا كانت الفولتية عبر المرحل تساوي فولتية تنظيمها فستكون هذه الفولتية نفسها تقريبا عبر محولي التيار كليهما ، وتيارات الاثارة المناظرة لهذه الفولتية يمكن ايجادها من منحني او منحنيات التمغنط . بجمع تيارات الاثارة لجميع محولات التيار في منظومة الحماية (ان منطقة قضبان حافلة في المنظومة قد تحتوي على اكثر من 30 محول تيار مربوطة على التوازي) ويضاف لها تيار التنظيم للمرحل ، ويمكن ايجاد التيار الثانوي ثم الابتدائي لمحول التيار الفعـــال .

ان تيار الابتدائي هذا يدعى بتنظيم الابتدائي للعطل (او تيار الاشتغال الابتدائي P.O.C.) . ومن المعتاد ان تجمع هذه التيارات حسابياً وذلك لكونها في طور واحد تقريباً . تنظيم الابتدائي للعطل المحسوب هذا يكون متحفظاً ويجب ان يكون أقل من تيار العطل الداخلي الموجود . ان نسبة الاستقرارية لمنظومة حماية هي نسبة تيار حد الاستقرارية الى تنظيم العطل الابتدائي .



الشكل 9.10 . مرحل انحيازي (يعمل بفرق النسبة المئوية)

المرحـــلات المنحـــازة :

ان مرحل المنتج المنجذب المبين في الشكل 9.9 قد يستعاض عنه الآن بمرحـــل منحاز . (الشكل 9.10) . والمرحل المنحاز يحتوي على مرحلين من ذوات القطـــب المظلل يعملان على القرص نفسه ولـكن ينتجان عزمين متعاكسين .

ملف التشغيل (O) الذي يحمل التيار الخارج عن التوازن (المراق) خلال عطــل خارجي . يحاول أفلات المرحل بينما الملف المنحاز (B) الذي يكون ذا نقطة توصيل في منتصفه . يحمل قيمة تيار العطل المكافئة في الثانــوي ويحاول كبح المرحل .

خلال العطل الخارجي (النافذ) ، يحمل كلا نصفي الملف المنحاز تيارات كبيرة والأمبير– لفة لهما ينضاف بعضهما الى بعض . بينما ملف التشغيل يكون حاملاً لتيار غير متوازن صغير بسبب عدم كمال منظومة الحماية . وخلال عطل داخلي مغذى من جهتين ، فأن التيار الأيمن المرشد يقاس اتجاهه بحيث يكون فعل الأنحياز ضعيفاً وفعل التشغيـــل يكون قوياً. أما خلال عطل داخلي مغذى من جهة واحدة فقط فيكون تيار المرشد الأيمن صفراً . وعليه سيمر التيار نفسه في ملف التشغيل وكذلك في نصف ملف الأنحياز . لهذا يجب تصميم المرحل لكي يشتغل تحت هذه الظروف . وللمرحلات ذات الأقطاب المظللة والمتشابهة التصميم يجب أن يحتوي ملف التشغيل فيها على عدد لفات يزيد عــن نصف عدد لفات ملف الأنحياز .

يكون تنظيم المرحل بقدر التيار الادنى في ملف التشغيل فقط (الأنحياز صفراً) الذي سوف يشغل المرحل : ويعبر عن التنظيم هذا بنسبة مئوية من التيار المقنن . ان تيار التنظيم (I_0) ينتج عزماً مدوراً للتغلب على كل من نابض الأرجاع والأحتكاك وكذلك القصور الذاتي .

ان الأنحياز (B) للمرحل هو نسبة عدد اللفات في ملف الانحياز الى عدد اللفات في ملف التشغيل وهذا يتم بفرض أن الدائرتين المغناطيسيتين للأقطاب المظللة متماثلتان. القيم النموذجية للتنظيم تكون ، بالنسبة للمولد من 10 الى 20 % ويكون الأنحياز 10 % وللمحول يكون التنظيم 20 % أما الأنحياز فيؤخذ من 20 الى 40 % (تستخدم القيــم العالية للأنحياز للمحولات ذات مآخذ التغيير) .

اذا كانت N تمثل عدد اللفات في ملف التشغيل فعليه تكون

أمبير لفات التشغيل = $(I_1 - I_2)/N$

وأمبير– لفات التجهيز = $(I_1 - I_2)N$

وأمبير لفات الأنحياز = $I_1(B/2)N + I_2(B/2)N$

$$= \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)BN$$

ملف التشغيل (O) الذي يحمل التيار الخارج عن التوازن (المراق) خلال عطل خارجي ، يحاول أفلات المرحل بينما الملف المنحاز (B) الذي يكون ذا نقطة توصيل في منتصفه ، يحمل قيمة تيار العطل المكافئة في الثانوي ويحاول كبح المرحل .

خلال العطل الخارجي (النافذ) ، يحمل كلا نصفي الملف المنحاز تيارات كبيرة والأمبير – لفة لهما ينضاف بعضها الى بعض ، بينما ملف التشغيل يكون حاملاً لتيار غير متوازن صغير بسبب عدم كمال منظومة الحماية . وخلال عطل داخلي مغذى من جهتين ، فأن التيار الأيمن المرشد يقاس اتجاهه بحيث يكون فعل الأنحياز ضعيفاً وفعل التشغيل يكون قوياً . أما خلال عطل داخلي مغذى من جهة واحدة فقط فيكون تيار المرشد الأيمن صفراً ، وعليه سيمر التيار نفسه في ملف التشغيل وكذلك في نصف ملف الأنحياز . لهذا يجب تصميم المرحل لكي يشتغل تحت هذه الظروف . وللمرحلات ذات الأقطاب المظللة والمتشابهة التصميم يجب أن يحتوي ملف التشغيل فيها على عدد لفات يزيد عن نصف عدد لفات ملف الأنحياز .

يكون تنظيم المرحل بقدر التيار الادنى في ملف التشغيل فقط (الأنحياز صفراً) الذي سوف يشغل المرحل : ويعبر عن التنظيم هذا بنسبة مئوية من التيار المقنن . ان تيار التنظيم (I_0) ينتج عزماً مدوراً للتغلب على كل من نابض الأرجاع والأحتكاك وكذلك القصور الذاتي .

ان الأنحياز (B) للمرحل هو نسبة عدد اللفات في ملف الانحياز الى عدد اللفات في ملف التشغيل وهذا يتم بفرض أن الدائرتين المغناطيسيتين للأقطاب المظللة متماثلتان . القيم النموذجية للتنظيم تكون ، بالنسبة للمولد من 10 الى 20 % ويكون الأنحياز 10 % وللمحول يكون التنظيم 20 % أما الأنحياز فيؤخذ من 20 الى 40 % (تستخدم القيم العالية للأنحياز للمحولات ذات مآخذ التغيير) .

اذا كانت N تمثل عدد اللفات في ملف التشغيل فعليه تكون

أمبير لفات التشغيل = $(I_1 - I_2)/N$

وأمبير – لفات التجهيز = $(I_1 - I_2)N$

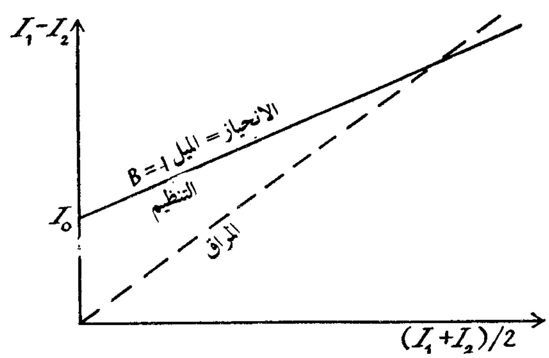
وأمبير لفات الأنحياز = $I_1(B/2)N + I_2(B/2)N$

$$= \left(\frac{I_1 + I_2}{2}\right)BN$$

وبفرض علاقات خطية . فان المرحل سوف يعمل عندما

$$|(\mathbf{I}_1-\mathbf{I}_2)N|-|(\mathbf{I}_1+\mathbf{I}_2)(BN/2)|>|\mathbf{I}_0N|$$

وتكون معادلة التوازن لتشغيل المرحل هي (الشكل 9.11)



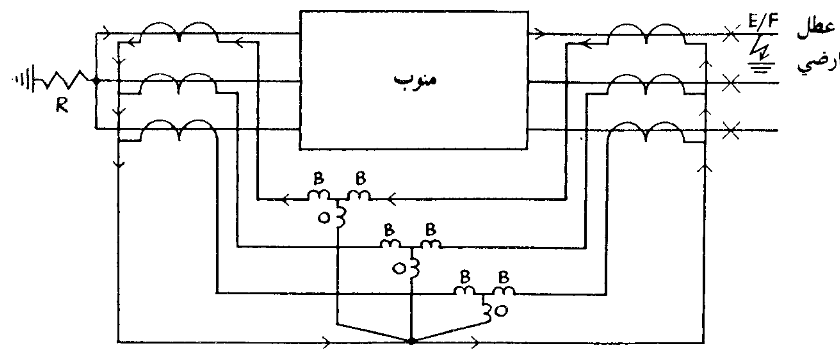
الشكل 9.11. مميزات المرحل الانحيازي

$$|\mathbf{I}_1-\mathbf{I}_2|=|\mathbf{I}_0|+|(\mathbf{I}_1+\mathbf{I}_2)(B/2)| \quad [9.9]$$

عليه فان المرحل سوف يفصل لتيارات تشغيل أكبر من تلك المعطاة بوساطة خط الأنحياز. والتيار الخارج عن التوازن (المراق) في ملف التشغيل للمرحل بسبب عدم الكمال في منظومة الحماية يبين في الشكل بخطوط منقطة ، ولتحقيق الأستقرارية ، يجب ان يقع تحت خط الأنحياز تماماً .

المخطط النسبي المبين في الشكل 9.11 لايوضح المعلومات بصورة جيدة وذلك لأن تيار التشغيل ($\mathbf{I}_1 - \mathbf{I}_2$) قد يكون ناتجاً عن فرق في مقدار أو طور أو في كليهما .
عليه يمكن تمثيل خواص المرحل المميزة بصورة أفضل باستخدام المميزات القطبية لـ ($\mathbf{I}_1 / \mathbf{I}_2$) في المستوى المركب .

ان الرسم البياني الأحادي الخط والمبين في الشكل 9.9 سوف نعيد رسمه الان في الشكل 9.12 بوصفه مخططاً ثلاثي الطور لحماية مولد ما : وللمنوبات الصغيرة .



الشكل 9.12 . حماية انحيازية فرقية لمنوب. تكون المرحلات الثلاثة كلها في وسط الدارة المرشدة

يمكن ابدال المرحلات المنحازة بمرحلات ذات المنتج المنجذب مغناطيسياً مع مقاومات اقرار. وتكون محولات التيار الستة متماثلة (متوافقة) . يوضح المخطط أن المنظومة تكون مستقرة لعطل ارضي خارجي . ولايمر تيار الثانوي للعطل في محولات التيار الموقفة عن العمل الأربعة وذلك لأن ممانعات هذه المحولات تكون عالية جداً (مفاعلة مغناطيسية) على الطالب ان يتأكد من ان المنظومة تكون مستقرة أيضاً لعطل خارجي طور الى طور ولكنها يجب ان تشتغل لأعطاء الأرضي الداخلية . ومن المعتاد بالنسبة للاعطال الداخلية أن تؤخذ أسوأ الحالات بنظر الأعتبار . وهذا يعني أنه لاتوجد تغذية داخلية من قضبان التوزيع ، وتكون ملامسات الأفلات للمرحلات الثلاثة مربوطة على التوازي .

ان منظومة حماية مولد رئيسية ونموذجية قد يكون لها تنظيم قدره 10% وانحياز 5% . وزمن تشغيل لايتعدى ثلاث او اربع دورات عند خمسة أمثال تنظيم العطل وتكون مستقرة لحد 12·5 بقدر التيار المقنن لمحول التيار في الاقل .

واذا حدث عطل داخلي على ملفات الساكن . فليس من الكافي فتح قاطع الدورة الرئيس لأزالة العطل وذلك لأن المولد نفسه يمكن ان يستمر في تجهيز القدرة الى العطل

وللمولدات الصغيرة فان قاطع دورة ثلاثي القطب في نهاية محايد المولد سوف يزيل تيارات عطل الارضي وعطل الطور وتجهز معظم المولدات في الوقت الحاضر بوسائل لأخماد المجال المغناطيسي اي ملامس يصل قبل ان يقطع والذي يوصل مقاومة تخميد المجال عبر ملف الدوار . لتبديد الطاقة الكهرومغناطيسية . وبعدها يفتح الدائرة الى مجهـــز الاثـــارة .

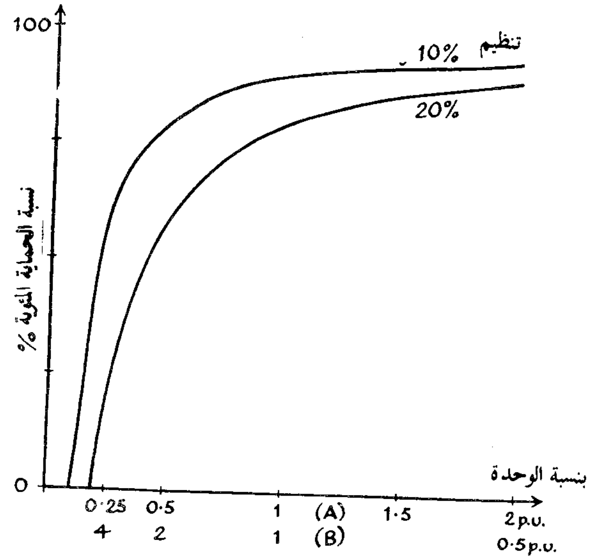
اذا اشتغلت الحماية الرئيسية . فيجب فتح قاطع الدورة الرئيسي . وعليه تشتغل أجهزة تخميد المجال وتغلق جميع مجهزات البخار . بالسرعة الممكنة لها جميعاً .

يتم تجهيز المنوبات الكبيرة باجهزة حمائية اخرى بالاضافة الى الحماية الرئيسية . ان مرحلات تيار التتابع السالب تجهز بمجموعة محولات تيار عند طرف محايد المولد (أنظر الفقرة 8.5.1) . وتقوم تيارات التتابع السالب هذه والتي تكون بسبب عدم اتزان التحميل او نتيجة الاعطال على المنظومة . تحث تيارات دوامية ذات تردد 100 هرتز في الدوار وتعمل على تسخينه اضافة الى العوامل الاخرى . ولما كان تبريد الدوار هو مسألة مهمة فان التسخين الاضافي هذا لايمكن تحمله لفترة طويلة . ان خواص المرحل تكون من نوع $I_2^2 t$ = ثابت. وتجهز المولدات ايضاً بأجهزة لتأشير الحرارة العالية وكذلك لتأشير حالة الاثارة المفرطة او الاثارة الواطئة . وفشل تبريد الاجهزة وكذلك فقدان التفريغ في التوربين اذا اشتغل اي جهاز لافوري فانه يغلق مجهز البخار اولاً ويفتح فقط قاطع الدورة عندما يكون التوربين قد بدد بخاره المحبوس : والحالة الأخيرة هذه تؤشر في لوح السيطرة عندما يشتغل مرحل القدرة – المرتدة للمنوب .

ان منظومة الحماية الفرقية الطولية سوف لاتكتشف قصر الدورة بين اللفات على طور واحد (فيما عدا الاحتمال الوارد بان يتحول مثل هذا العطل الى عطل ارضي داخلي) .

اذا حدث عطل ارضي قرب نقطة التفرع النجمي لمنوب . فان الفولتية خلف العطل قد تكون غيركافية لتنشيء تيار تشغيل مرحل اكبرمن تيار الالتقاط (تنظيم) للمرحل .

ولمولد مربوط مباشرة الى حمل (وهذا لايشمل مجاميع مولد مع محول) فانقيمة مقاومة التأريض R في الشكل 9.12 تكون حوالي 1 بنسبة الوحدة وبتقنين المولد . بما ان المفاعلة (العابرة)لطور مولد تكون حوالي 0.2 بنسبة الوحدة . فالمفاعلة لجزءصغيرمن



الشكل 9.13. النسبة المئوية لمنوب نجمي ضد اعطال الارضي المقياس (A) تيار عطل الارضي . المقياس (B) مقاومة التأريض

طور قريب من نقطة التفرع النجمي يمكن اهمالها اذا ماقورنت مع R : وفي العادة فاننا نتبصر في الحالة البسيطة المتحفظة لمنوب في حالة اللاحمل عند الفولتية والسرعة المقننتين.

لذا فلمقاومة $R=0·8$ بنسبة الوحدة (فولتية الطور عليها تكون 0·8 بنسبة الوحدة عندما تحمل التيار المقنن) ومنظومة حماية فرقية لها تنظيم لعطل ارضي مقداره 20٪ من التيار المقنن للمولد . عليه فان عطلا ارضياً بمسافة $0·8\times20=16$٪ من نقطة التفرع النجمي هو أقل مايكفي لتشغيل الحماية . لذلك فان 84 ٪ من الطور فقط يكون محمياً ضد الاعطال الارضية الداخلية . وبهذا الاسلوب يمكن استنتاج الشكل 9.13. ومن باب الفائدة رسم المحور الافقي في هذا الشكل بمقياس خطي (A) ليمثل التيار الذي ستنشئه فولتية الطور المقننة في مقاومة التأريض المناظرة والتي تكون قيمتها معطاة في المقياس اللاخطي (B) . ان هذا التيار يشار اليه بتيار الفولتية المقننة لعطل ارضي طرفي : ومفاعلة المحول لاتزال مهملة . الشكل 9.13 يبين انه لمقاومة تأريض مقدارها 1 بنسبة الوحدة وتنظيمات مرحل مقدارها 10 او 20 ٪(من التيار المقنن للمولد) يكون من 80 الى 90 ٪ من الطور محمياً فقط .

لما كان العازل متجانساً على كل ملفات الطور . وكانت الماكنة محكمة الغلق . فانه من المستبعد احتمال حدوث عطل ارضي قرب نقطة التفرع النجمي في داخل المولد . واذا لم يشغل مثل هذا العطل الحماية الرئيسية فانه سيشغل مرحل عطل الارضي الاحتياطي . وهذا يكون مرحلاً حساساً لاوحدياً وله مميزات زمن عكسية طويلة كما أنه يجب ان يكون متدرج الزمن مع مرحلات الـ I.D.M.T.L المربوطة على منظومة التوزيع

على الطالب الان ان يحلل هذه المسألة ويبين ان

$$x = kI_sR/V \qquad [9.10]$$

حيث ان x = موضع العطل من نقطة التفرع النجمي معبراً عنه بجزء من طول الطور الكلي (اي الجزء من خلف الطور اللامحمي) .

I_s = تيار تنظيم المرحل بالامبير
k = نسبة تيار محول التيار
V = فولتية الطور بالفولت
R = قيمة مقاومة التأريض بالاوم

ان kI_s هو تنظيم المنظومة الحمائية مقاساً على جهة الابتدائي لمحول التيار (تنظيم العطل للابتدائي) . واذا ماعبر عن جميع الكميات بنسبة الوحدة (pu) من تيار المولد المقنن فعليه تصبح المعادلة [9.10] م

$$x = I_{s\cdot pu}R_{pu}/V_{pu} \qquad [9.11]$$

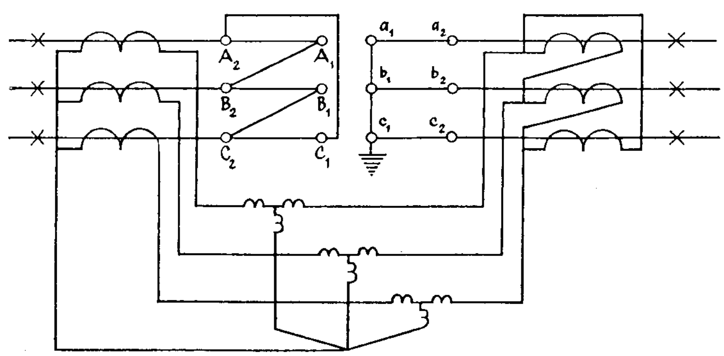
وقد تم رسم الشكل 9.13 للحالة عندما يكون $V_{pu} = 1$.

المشاريع الحمائية للمحولات *Transformer Protective Schemes*

ان منظومة الحماية ذات التيار الدوار (الفرقية) يمكن ان تستعمل لتعطي حماية شاملة لمحول ثلاثي الطور (الابتدائي والثانوي يشكلان منطقة واحدة) ولكن يجب الادراك أن عملية مقارنة التيارات تتم عند المرحلات التي تكون مربوطة على جهة الثانوي لمحولات التيار .

بما ان تيارات الخط للابتدائي والثانوي لاتكون متساوية عندما يكون المحول محملا ولكن تكون بنسبة عكسية لنسبة فولتية الخط نفسه . لذا تكون التيارات المقننة لابتدائي مجموعتي محولات التيار بالنسبة العكسية نفسها كذلك .

وعندما يكون محول مثلثي / نجمي محملاً . فان تيارات الخط للابتدائي والثانوي تكون مفترقة الطور بزاوية مقدارها 30° (انظر الفقرة 8.3.5) . ولكي نجعل تيارات الثانوي لمحول التيار بالطور نفسه مع بعضها يجب ربط ثانويات محولات التيار بشكل نجمي على جهة الربط المثلثي من محول القدرة . كذلك ربطها بشكل مثلثي على جهة الربط النجمي من المحول نفسه (وهذه العبارة سوف يتمتبريرها لاحقاً) . وبما ان



الشكل 9.14 حماية متحازة فرقية لمحول قدرة

تيارات الخط . في ظروف توازن ثلاثة اطوار . من مجموعة من محولات التيار مربوطة بشكل مثلثي تكون $\sqrt{3}$ مضروباً في تيارات الثانوي . يكون تيار الثانوي المقنن لكل محول تيار مربوط بشكل مثلثي $5/\sqrt{3} = 2.89$ أمبير لمرحل مقنن عند أمبير أو $1/\sqrt{3} = 0.577$ أمبير لمرحل مقنن عند 1 أمبير . لذلك فان محولات التيار على جهة الضغط العالي لمحول قدرة ك . ق . قد يقنن عند أمبير أما التي على جهة الضغط الواطيء فتقنن ,1200/0.57 أمبير .

على الطالب ان يتأكد بنفسه ان مشروع حماية ذي تيار دوار كلي يستخدم هذه النسب لمحولات التيار . سوف يكون مستقرا عندما يكون على المحول حمل قدرة

1200 أمبير على جهة الثانوي (انظر الشكل 9.14) : وعليه ان يتأكد ايضا من الاستقرارية لعطل ارضي خارجي ولعطل طور الى طور خارجي . ويتأكد من ان الحماية يجب ان تعمل لعطل داخلي (غير تلك التي تكون بين اللفات على ملف واحد من الملفات) . لعطل داخلي طور الى طور على جهة الثانوي . لاحظ ان التيار في احد المرحلات يكون ضعف التيار في المرحلين الآخرين .

اذا ماحدث عطل ارضي خارجي على جهة الثانوي المربوط بشكل نجمي لمحول قدرة . فان خطوط الثانوي سوف تحمل تيارات التتابع الصفري (انظر الفصل 8) ولكن لايمكن ان يمر تيار التتابع الصفري في خطوط الابتدائي للمحول المذكور . ولذلك وللحصول على تيار متوازن في المرحل . يجب منع تيارات التتابع الصفري من الوصول الى الاسلاك المرشدة وذلك بربط الملفات الثانوية لمحولات التيار على شكل مثلثي . وبهذا سوف يسري تيار التتابع الصفري . بصيغة تيارات احادية الطور . ضمن الملفات الثانوية لمحولات التيار المربوطة بشكل مثلثي وضمن الملفات الابتدائية المربوطة بشكل مثلثي لمحول القدرة نفسه .

وبالاسلوب نفسه . اذا كان لمحول القدرة ابتدائي مربوط ربطا نجميا غير مؤرض وثانوي مربوط على شكل نجم – مؤرض . فان محولات التيار يجب ربطها بشكل مثلثي / مثلثي ان توزيع التيار في مثل هذا المحول خلال عطل ارضي تمت مناقشته في الفقرة 6.8 . على الطالب ان يبين أنه اذا كان العطل خارجيا لعموم منطقة الحماية . فان الحماية تكون مستقرة .

اما المرحلات المستخدمة في جميع منظومات حماية المحولات تكون من النوع الانحيازي وذلك للاسباب التالية :

(أ) اذا استخدمت حماية شاملة (وهذه تستخدم للمحولات الكبيرة فقط فسوف يحتمل ان يجهز المحول بمبدل لتغيير المأخذ في حالة الحمل . وليس من العملي تغير نسبة محول التيار لكي تتوافق مع نسبة محول القدرة المتغيرة . اذ ان نسبة محول التيار تكون ثابتة ويتم اختيارها بحيث تلائم النسبة المقننة لمحول القدرة نفسه . لذلك فللمآخذ التي لاتعطي القيم المقننة سوف يمر تيار خارج عن التوازن في المرحل خلال الحمل وخلال ظروف العطل الخارجية .

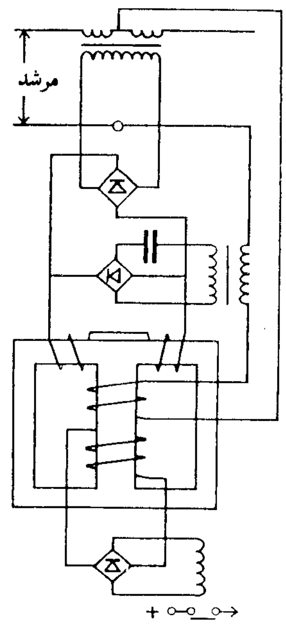
(ب) بما ان مجموعتي محولات التيار تكون مختلفة في التصميم (تيارات وفولتيات مقننة مختلفة) . فانه من الصعب بمكان التوفيق فيما بينها وعليه فان التيار الخارج عن التوازن سيمر في المرحل خلال ظروف عطل خارجية قاسيـــــــة .

عندما يكون المحول في حالة اللاحمل . يظهر تيار اللاحمل في المرحل كما لوكانت هناك حالة عطل داخلي . وعليه يجب ان يكون تنظيم تيار المرحل اكبر من تيار اللاحمل عندما يعبر عنهما بنسب مئوية من تيار الابتدائي المقنن .

لهذا السبب وللاسباب المذكورة في (أ) و (ب) اعلاه . فان المنظومات الحمائية الشاملة للمحول تكون لها تنظيمات اعلى من تلك التي للمولدات . وعلى سبيل المثال يستخدم للمحول تنظيم 40% وانحياز مقداره 20% .

عند توصيل محول غير محمل الى المصدر . قد يصل تيار المغنطة الاولي فيه الى قيمة تبلغ عدة مرات بقدر التيار المقنن . ويدعى هذا بتيار المغنطة الاندفاعي او التموري (انظر الفقرة 6.6 والشكل 6.15 . ولمنظومة حمائية شاملة تستخدم مرحلات انحيازية اعتيادية فانها سوف تنظر الى تيار التمور هذا وكأنه عطل داخلي . من المعتاد سابقا ان نحل هذه المعضلة بتأخير زمن الحماية حتى يكون تيار المغنطة اقل من تنظيم الحماية نفسها . تأخير مقداره حوالي نصف ثانية) . لكن هذا يؤدي الى تأخير ازالة عطل داخلي حقيقي . وكلما اصبح المحول كبيرا وثمنه غاليا . فانه سوف لن يسمح لمثل هذا التأخير . وهذه المعضلة تم حلها بملاحظة حقيقة ان تيار التمور له مركبة كبيرة للتوافقي الثاني (100 هرتز) بينما في حالة العطل الحقيقي تكون هذه المركبة صغيرة . وعليه فان دائرة رنين توال مولفة لتردد 100 هرتز تكون مقترنة تبادليا داخل دائرة ملف التشغيل للشكل 9.14 وكما موضح في الشكل 9.15 ، والتيار الخارج من هذا الاقتران يتم تقويمه وتغذيته بعد ذلك الى ملف الانحياز او السيطرة للمفاعلة المحولة . او ملف انحياز العطل النافذ للشكل 9.14 فيبدل بمحول يقوم خرجه كذلك ويغذى الى ملف السيطرة . يأخذ ملف الادخال (الابتدائي) للمفاعلة المحولة تيار التشغيل للمنظومة الحمائية . بينما التيار الخارج (الثانوي) يتم تقويمه وتغذيته الى مرحل من نوع المنتج المنجذب اللحظي . وبغياب انحياز التيار المستمر فان المفاعلة المحولة تتصرف كما لوكانت محولا وان حدوث اي عطل داخلي سيسبب تشغيل مرحل الافلات . لكن في حالة العطل النافذ او تحت ظروف تمور المغنطة .

فان انحياز التيار المباشر يشبع المفاعلة المحولة . وبهذا يحدد من نبض الفيض المتناوب (a.c.) بسبب تيار المفاعلة المحولة الابتدائي . وبهذا يحدد من خرج الثانوي مما يؤدي الى عدم اشتغال مرحل الافلات . يشار الى هذه المنظومة بمنظومة حمائية ذات



الشكل 9.15 الانحياز التوافقي

تيار دوار وانحياز توافقي شاملة . وتستخدم للمحولات الكبيرة ذات المأخذ المتغير . اما التنظيمات النموذجية لهذه المنظومة فهي : تنظيم 20٪ انحياز 20 الى 40٪ زمن التشغيل الاقصى 4 دورات عند (5) خمسة اضعاف تنظيم العطل . وحد أدنى للاستقرارية 16 مرة بقدر التيارالمقنن لمحولات التيار .

بالاشارة الى الشكل 9.14 (ولكن بوضع مقاومةتأريضبدلا من الارضي المباشر) . فاذا حدث عطل ارضي على ملف الثانوي المربوط على شكل نجمي وعند مسافة x من نقطة التفرع النجمي . معبرا عنها بكسر من طول الطور الكلي . فعلى الطالب ان يبين أن

$$\text{تيار المرحل} = \frac{x^2 V_s N_s}{R N_p k} \quad \text{امبير} \qquad [9.12]$$

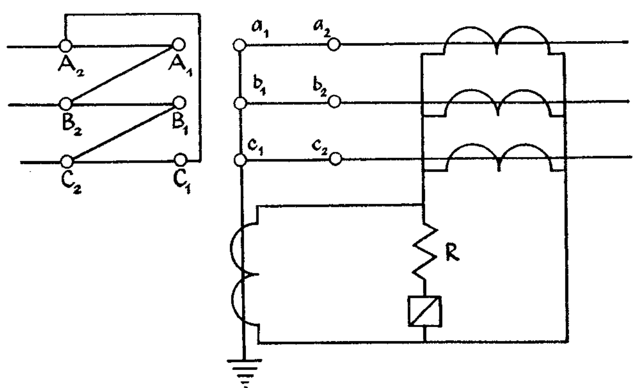
حيث ان V_s = فولتية الثانوي فولت / طور

N_s = لفات الثانوي / طور

N_p = لفات الابتدائي / طور

R = قيمة مقاومة التأريض بالاوم

k = نسبة محولات التيار على جهة الابتدائي .



الشكل 9.16. حماية محددة لعطل ارضي .

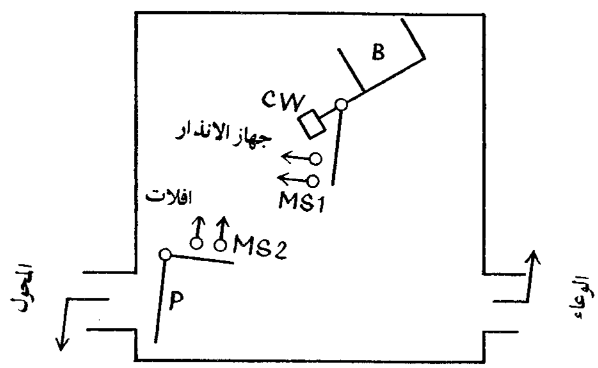
لقد تم اشتقاق المعادلة [9.12] على فرض ان المحول في حالة اللاحمل وان العطل يغذى من جهة الابتدائي فقط . بما أن $x<1$ ، فعليه ولقيم صغيرة لـ x (الجزء غير المحمي من الملف) فان تيار المرحل يكون صغيراً جداً خاصة لمحول خافض $(N_s<N_p)$ بمقاومة تأريض عالية . لذلك فان تصميم منظومة حمائية مقبولة لمحول قدرة من الممكن ان يكون مسألة صعبة .

على الطالب هنا ان يحول المعادلة [9.12] الى نظام نسبة الوحدة معتمداً على تقنين المحول نفسه وعليه ان يبرهن ان

$$x^2 = \sqrt{3}\,(PFS)_{pu} R_{pu}/V_{pu} \qquad [9.13]$$

حيث أن (PFS) = تنظيم العطل للابتدائي (وهو تيار الابتدائي اللازم لتشغيل المرحل معبراً عنه بكسر أو جزء من تيار الخط المقنن الابتدائي المحول) ،
R_{pu} = قيمة مقاومة التأريض ، بنسبة الوحدة
V_{pu} = فولتية المحول بنسبة الوحدة

لذلك اذا كانت $(PFS) = 0{\cdot}2$ بنسبة الوحدة و$1 = V_{pu}$, $1 = R_{pu}$ فعليه $x = 0{\cdot}588$ وان $1 - x = 0{\cdot}412$ وهذا يعني ان $41{\cdot}2$ %فقط من الملف يكون محمياً .



الشكل 9.17. مرحل بوخهولز (الغازي)

ان معضلة حماية جزء مناسب من ملف الثانوي للمحول هذه تم التغلب عليها بصورة جزئية باضافة منظومة حمائية محددة ضد عطل الارضي وكما مبينة في الشكل 9.16 . حيث تكون محولات التيار هنا متماثله (ومتوافقة) وتشكل منظومة حماية تيار دوار التي تتضمن مقاومة اقرار (R) . خلال عطل أرضي داخلي يغذى من جهة الربط المثلثي فقط ، فان محول التيار المربوط على المحايد يمد بالطاقة لوحده وعليه تكون التحليلات مشابهة لتلك التي تم ذكرها لحماية المولد .قد يمكن أن يكون تنظيم العطل واطئاً (قل 10 %) وذلك لان هذه المنظومة لا تعاني من أي من مساوىء منظومة حماية المحول الشاملة .

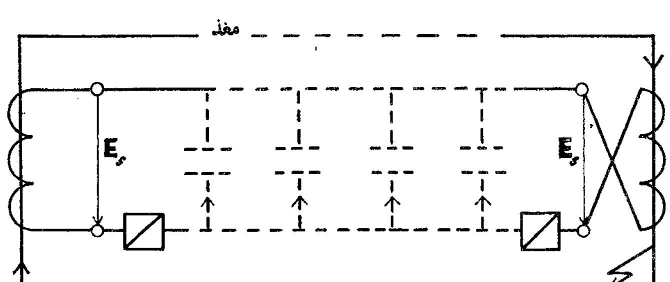
ان جميع المحولات تزود بجهاز حماية من نوع بوخهولز أو مرحل محفز بالغاز وهذا يربط بانبوب الزيت بين وعاء المحول وحافظة الزيت . تركيبه الداخلي مبين تخطيطياً في الشكل 9.17 . تحت الظروف الصحيحة الاعتيادية يكون المرحل مملوء بالزيت ، وهذا يشمل الدلو (B) ، ولكن المنقل المعاكس CW يكون منظماً ليبقي اقليد (switch) الزئبق MS1 مفتوحاً . فاذا كان هناك أي فشل جزئي في العازل في أي مكان داخل المحول فان الغاز يتجمع في أعلى المرحل نفسه . وعندما يهبط مستوى الزيت ، حيث يكون الوعاء مملوء بالزيت ، يصبح الزيت الان أثقل من الثقل المعاكس ، عليه سوف . يقوم بأمالة اقليد الزئبق الى وضع الغلق وبذلك يشغل جهاز الانذار .

اذا كان هناك عطل دائرة قصيرة داخل المحول فان الانفجار اللحظي يدفع الزيت غير المضغوط ضد اللوح p ويغلق اقليد الزئبق MS2 والذي بدوره يقوم بافلات قاطع الدورة . هناك تصميم آخر يستخدم الكرة العائمة بدلاً من الوعاء لعضو الانذار .

9.5.2 المنظومات الحمائية ذات الفولتية المتوازنة

BALANCED VOLTAGE PROTECTIVE SYSTEMS

تكون الحماية الفرقية لوحدة منظومة التيار الدوار ملائمة للقطاعات القصيرة مثل المولدات والمحولات ، واذا استخدمت مثل هذه المنظومات الى مغذيات طولها يتجاوز كيلومترات متعددة ، فان القوى الدافعة الكهربائية لثانوي محولات التيار يكون المطلوب منها امرار تيار حوالي 5 أو 1 أمبير عند الحمل الكلي ، أو عدة امثال هذه التيارات خلال ظروف العطل الخارجي حول دارة مرشدة لها ممانعة عالية نوعاً ما . ان مثل هذا العبء يكون غير عملي لاي تصميم اقتصادي لمحول التيار .



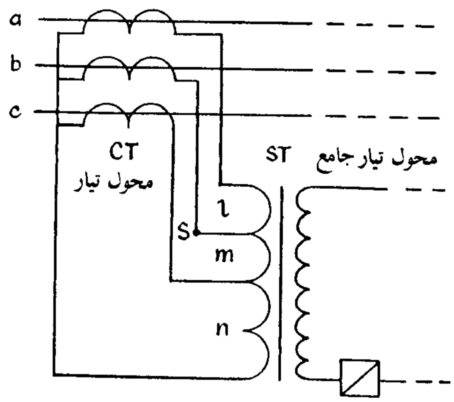
الشكل 9.18. المنظومة الحمائية ذات الفولتية المتوازنة .

ان احد الحلول لهذه المعضلة المستخدم سابقاً هو ربط احد محولات التيار بصورة عكسية كما موضح في الشكل 9.18 فخلال عطل خارجي تتعاكس القوتين الدافعتين الكهربائيتين للثانوي حول الدارة المرشدة وبذلك يكون كلا التيارين اللازمين لتشغيل المرحلين صفراً . من الناحية العملية فقد كانت استقرارية المنظومة للعطل النافذ ضعيفة جداً للسببين التاليين : الاول هو اشتغال محولات التيار في حالة الدائرة – المفتوحة وعليه تكون القوى الدافعة الكهربائية المتولدة في الملفات الثانوية لها عالية جداً . لذلك تتخذ هذه المحولات صفة اللاخطية نسبة الى تياراتها وعليه فقد كان من الصعوبة بمكان جعلها متوافقة فيما بينها . في محاولة لحل هذه المعضلة فقد صممت محولات التيار بحيث تتضمن فجوات هوائية متعددة صغيرة (محولات التيار ذات الفجوات – الهوائية الموزعة) ولكن ظهر أن اقل اضطراب في الفجوات الهوائية يؤدي الى فقدان التوافق فيما بينها . اما السبب الثاني فهو ان الاسلاك المرشدة يكون لها فولتية عبر طرفيها او على طول مسارها . وعليه تسري تيارات الشحن لمتسعة السلك المرشد داخل المرحل نفسه . وتعمل بذلك على تشغيله .

محولات الجمع *Summation Transformers*

تستخدم المنظومات الحمائية الحديثة للمغذيات عادة محولات جمع (انظر الشكل 9.19) حيث تكون محاسنها كالاتي : (أ) تكون محولات التيار في الخطوط من النوع الشائع التصميم وتشتغل بدائرة ذات عبء واطيء . (ب) يتم تغذية خرج محول الجمع الى منظومة لها سلكين مرشدين وهذا الخرج يكون متيسراً لاي نوع من العطل على اي من الخطوط الابتدائية (مع حالة شاذة واحدة وهذه سيتم مناقشتها لاحقاً) . لما كانت جهتا منظومة حماية المغذي متشابهة ، فان المنظومة المرشدة تستطيع ان تشتغل بوصفها منظومة فولتية متوازنة . يجب ان يفهم بوضوح أن مسألة تيارات شحن المرشد والتي تعمل على تشغيل المرحلات ستبقى تحت المناقشة بدلالة الحلول العملية .

ان بنية محول الجمع تكون مشابهة تماماً لبنية محول تيار الا ان الابتدائي يكون له مآخذ ويمكن له ان يشتغل بدائرة ثانوي مفتوحة .



الشكل 9.19. محول الجمع (ST)

ويحتوي ابتدائي محول الجمع على لفات قليلة من الاسلاك . وهومصمم بحيث أنه ، حتى اذا كان الثانوي له مفتوحاً . فان العبء الذي تسلطه على محولات التيار يكون وطئاً الى الحد الذي يكفي لجعل تصميم محولات التيار ضمن الضوابط المتفق عليها (الشائعة) .

لتكن l وm وn عدد اللفات في المقاطع الثلاثة للابتدائي . فعطل ارضي على الطور a سوف ينشيء تياراً ثانوياً في اللفات ($l+m+n$) بينما عطل طور الى طور عبر الطورين b و c سوف يدور تياراً في m من اللفات . لعطل داخلي لمنظومة معينة متغذية من طرف واحد فقط . وذات مرحل عند ذلك الطرف من نقطة التشغيل . سيكون خرج محول الجمع بالفولت امبير (VA) . وكذلك الدخل بالامبير لفات له ثابتين لجميع انواع هذه الاعطال . (يجب اضافة تيارات المغنطة وفقد الحديد المناظرة الى تيار التشغيل). لهذا سوف يكون تنظيم العطل لنوع معين من العطل متناسباً عكسياً مع عدد اللفات (تناسباً حقيقياً اونسبياً) لابتدائي محول الجمع التي تكون فعالة لهذا العطل . واذا اعطي تنظيم عطل معين وكذلك l , n , m فان جميع تنظيمات العطل الاخرى يمكن حسابها . هذا الاعتماد الضمني لتنظيمات العطل هو من احد مساويء محول الجمع ولكنه غير مهم في اكثر الاحيان . ان تنظيمات عطل أرضي يمكن تقليلها (جعلها اكثر حساسية) بزيادة n بدون التأثير على تنظيمات عطل الطور الى الطور التي لاتعتمد على قيمة n . بما ان المنظومة الحمائية هي منظومة وحدية فليس من الضروري جعل تنظيمات عطل الطور الى الطور اكبر من تيار الحمل الاقصى .

من المعتاد عملياً استعمال $l = m$. وتعرف اللفات ضمن المَقطع أو الجزء بتعابير نسبية مثل $n \cdot 1 : 1$.على الطالب الان ان يبين ان العدد الفعال (النسبي) للفات المأخوذة بنظر الاعتبار لعطل متماثل ثلاثي الطور يكون $\sqrt{3}$ (وهو لايعتمد على n). (تلميح : استخدم نظرية التراكب أوخذ S في الشكل 9.19 نقطة تفرع نجمي) . بعد ذلك على الطالب أن يبين انه اذا كانت $n = 4$ (نسبي) واذا كان التنظيم لعطل ارضي على الطور a هو 40 % (من تيار المرحل المقنن) فعليه يكون التنظيم لعطل ارضي على الطور c هو 60 % . ولعطل طور الى طور عبر a و c يكون120 % ولعطل ثلاثي الطور139%.

ان مايسمى بالبقعة العمياء لمحول جمع تظهر عندما تكون نسب تيارات الخطوط $1 : -2 : 1$ على الاطوار a و b و c على التوالي . لهذا الظرف من العطل سوف لايكون هناك خرج من المحول الجامع . على الطالب أن يحقق هذه العبارة ويجد الظروف التي فيها قد تظهر هذه الحالة من العطل . ان هذه المسألة قد تحل بجعل $l \neq m$ ولكن عملياً قديسبب هذا ظهورمشاكل اخرى.

المرشدات Pilots

لغرض حماية قابلوات القدرة المدفونة تحت الارض فان مرشد الحماية يمد اعتيادياً في وقت مد قابلوات القدرة نفسه . لما كانت التحديدات على استخدام حجم السلك قليلة ، ومسار الطول له اعتيادياً اقل من 15 كيلومتر ، فان مثل هذه المرشدات يشار اليها بالمرشدات ذات الممانعة – الواطئة .

اما بالنسبة لخطوط القدرة العلوية المعلقة فتكون المسألة اصعب بكثير . فالمرشدات المعلقة على الابراج نفسها مع خطوط القدرة تعد آخر حل يلجأ اليه . وقد تكون المرشدات المدفونة على نوعين – البريدي أو الهاتفي الخاص .

تصمم خطوط الهاتف البريدية للاتصالات . فاذا كان خط الهاتف مفتوح –الدائرة اومقصور– الدائرة اوحتى اذا كانت قطبيته معكوسة، فانه ليس من المفيد استخدامه لهذا الغرض ولكن عند استعماله مرشد حماية فان هذه الاحداث قد تكون خطرة . على الطالب أن يتأمل تأثيركل منها على منظومة متوازنة الفولتية . فطلبات دوائر البريد تقضي

بان يكون هناك حاجز مقداره 15 ك .ف . بين محولات التيار ومرشد الهاتف وان فولتية المرشد يجب أن تحدد بقيمة 130 ف (قيمة ذروة) ويحدد التيار الى 60 ملي أمبير (ج.م.ت) . ان مرشدات دوائر البريد تكون اعتيادياً معرضة الى الاشراف (المراقبة) المستمر بوساطة منظومة الحماية لأكتشاف التداخل معها (وليس لمنعه) .

ومع تطور منظومات الاشراف لاغراض السيطرة البعيدة في منظومة القدرة باستخدام القابلوات الهاتفية المتعددة الاسلاك فانه قد يصبح اقتصادياً اضافة واجبات مرشد الحماية الى منظومة الهاتف نفسها . ان مثل منظومات الهاتف الخاصة هذه تكون تحت اشراف أو سيطرة مسؤولي توليد الطاقة الكهربائية وذلك لكي تكون اقل عرضة للتداخل وتكون ايضاً ثابتة في خواصها الكهربائية وتكون اعتيادياً متجانسة على طول مسارها .

بما ان المرشدات الهاتفية تحتوي على اسلاك دقيقة وقد يصل طولها الى مسافة 50 كلم . فيشار اليها بالمرشدات ذات الممانعة العالية . تكون هذه الاسلاك خفيفة العزل وقريبة جداً بعضها من بعض وبذلك تكون لها متسعة كبيرة .

منظومات حماية المغذيات *Feeder Protective Systems*

ان منظومة الحماية ذات الفولتية المتوازنة والتي نحن بصدد وصفها الان هي المستخدمة اعتيادياً لحماية المغذيات الحلقية تتضمن قابلوات ارضية مقننة بفولتية 33 kV او اكثر واطوال مساراتها لاتتعدى بضعة كيلومترات . ولهذا تكون مرشداتها من النوع ذي الممانعة الواطئة . ويمكن استخدام هذه المنظومة لحماية الخطوط العلوية المعلقة باستعمال مرشدات ذات ممانعة عالية ومن النوع الهاتفي ولكن بتنظيمات عطل ابتدائي عالية .

ان كلتا نهايتي منظومة الحماية تتضمن محولات تيار ومحول جمع (كما في الشكل 9.19) . والاخير يعطي فولتية خارجة تعتمد على امبير – لفات العطل في ملفه الابتدائي . اما المرحل فيتضمن مفاعلة محولة ومرحل افلات خارجاً مشابهاً لذلك الموضح في النصف الاسفل من الشكل 9.15 .يستمد ابتدائي المفاعلة المحولة طاقته بوساطة التيار الدائر حول الدارة المرشدة اما بسبب عطل داخلي على المغذي او بسبب التيار الخارج عن التوازن (المراق) خلال عطل خارجي . ولمنع الافلات بسبب الاخير فان التيار المستمر d.c.

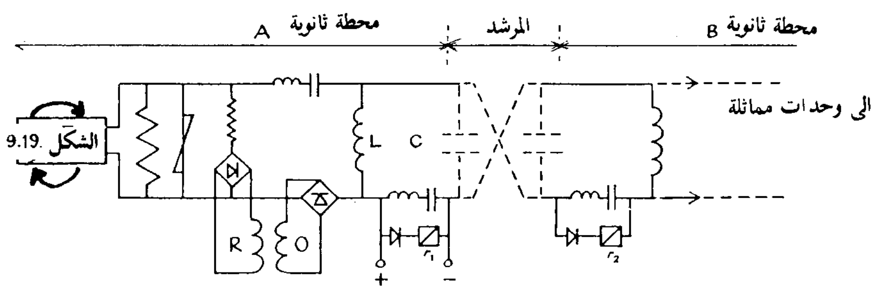
لملف السيطرة للمفاعلة المحولة يتم الحصول عليه من فولتية المرشد عبر مقاومة عالية ومقوم موجة تامة . وان المرحل يصمم بحيث يكون تيار السيطرة المستمر كبيراً وكافياً لمنع أو تقييد المرحل من الاشتغال لتيار مرشد صغير . وخلال عطل داخلي . فان تيار المرشد الكبير نسبياً . يجب أن يكون كافياً لتشغيل المرحل بالرغم من فعل الكبح أو التقييد لفولتية المرشد . عليه يجب أن يمتلك محول الجمع انتظام فولتية عالياً وهذا معناه كونه مصدر فولتية ذا ممانعة عالية . يكون محول الجمع مصمماً للتشبع بفولتية انحناء حوالي 100 فولت . وذلك لكي تحد تيار الشحن لسلك المرشد حتى يمكن استخدام منظومة الحماية مع مرشدات من النوع المستخدم في الهاتف . يؤدي التشبع الى ظهور توافقيات في التيار تتدفق في المرشد ولمنع هذه التوافقيات من المرور في ابتدائي المفاعلة المحولة فانه يتم ربط متسعة على التوازي مع الاخير ليكون دائرة رنين تواز مولفة الى تردد 50 هرتز .

على الطالب الان ان يرسم المخطط الكامل للدائرة (لكلا الجهتين) وباقطاب محول صحيحة لجعل منظومة الحماية تمتنع عن الاشتغال لعطل خارجي وتشتغل لعطل داخلي . للدلالة على منظومة حماية ذات فولتية متوازنة فمن المتعارف عليه أن توضح الاسلاك المرشدة بحيث تكون متقاطعة عند مركز الدارة المرشدة : وعليه تكون كلتا جهتي المنظومة صورة مرآة بعضهما لبعض .

في الدوائر المستخدمة عملياً فان تقييد الفولتية يتم الحصول عليه من ملف الثالثي لمحول الجمع وليس مباشرة من فولتية المرشد . ان منظومة الحماية هذه تكون ساكنة (ستاتيكية) الا لمرحل فصل الخرج . هناك منظومة حماية اخرى للمغذيات الحلقية تعمل بالفولتية المتوازنة . مصممة لحماية الخطوط العلوية المعلقة ذات طول مسار لايزيد عن 30 كم . باستخدام مرشدات هاتفية النوع وذات ممانعة عالية . وتستخدم كذلك الدائرة المبينة في الشكل 9.19 ولكن في هذه الحالة يصمم محول الجمع ليشتغل كما لو كان محول تيار وذلك بربط مقاومة ذات قيمة واطئة عبر طرفي الثانوي . ان الفولتية عبر هذه المقاومة هي الفولتية المسلطة على المرشد عبر المرحل نفسه (انظر الشكل 9.20) . عليه يكون محول الجمع مصدراً ذا ممانعة واطئة اذا مانظر اليه من خلال المرشد . اما اذا نظر اليه من خلال محولات التيار فسيكون عبءً ذا ممانعة واطئة حتى عندما تكون الدارة المرشدة مفتوحة الدائرة . تربط عبر المقاومة السالفة مقاومة لاخطية وذلك لتحديد فولتية المرشد الى حوالي 100 فولت خلال العطل الخارجي الاقصى (سوية مع دائرة ترشيح لمنع التوافقيات التي تحدث بسبب المقاومة اللاخطية من العبور الى المرحل).

يتم تقويم تيار المرشد كلياً ويستخدم لتغذية ملفً تشغيل المرحل (O) ويكون المرحل هذا من نوع الملف المتحرك ضمن مغناطيس دائم ومشابه تماماً للنوع المستعمل لمضخم الصوت الاعتيادي .

خلال حدوث عطل نافذ فان تيار الشحن المار الى نصف سعة المرشد (C) يتـم تجهيزه من قبل ملف التوليف الخانق (L) وعليه يشكلان دائرة رنين توازٍ . لذلك يمكن تقليل التيار في ملف التشغيل الى قيمة صغيرة بوساطة توليف الخانق بحيث يتوافق مع المرشد. قد يتم اجراء تحسين على استقرارية العطل النافذ وذلك باضافة ملف تقييد (R) يعمل بالفولتية وهذا يكون مصمماً للتغلب على فعل الايقاف الخلفي للمرحل وكذلك ضد الكبح الذي يحدثه اكبر تيار يمكن ان يمر في ملف التشغيل خلال عطل نافذ ما .



الشكل 9.20 حماية المغذي

اما خلال عطل داخلي ما (مغذى من جهة واحدة فقط) فان التيار في ملف التشغيل يجب ان يكون من القيمة بحيث يفلت المرحل ضد فعل ملف الكبح .

يبين الشكل 9.20 ايضاً صيغة نموذجية للمراقبة بوساطه المرشد حيث يتم امرار تيار حوالي 6 ملي امبير حول الدارة المرشدة بوساطة مصدر تيار مستمر ذي فولتية واطئة . يكشف المرحل (r_1) الفشل الذي قد يحصل في المصدر المشرف . اما المرحل (r_2) فيكشف الفشل للمرشد (الدائرة – المفتوحة او الدائرة القصيرة او عكس الربط) . كلا المرحلين يشغلان جهاز الانذار من خلال مرحلات مؤخرة للزمن والتي تمنع جهاز الانذار من الاشتغال للاضطرابات العابرة في الدارة المرشدة . اما المتسعات فتجعل التيار المستمر يتدفق حول الدارة المرشدة . اما ممانعاتها للتيار المتناوب فتلغى باستخدام دوائر رنين توالٍ.

المنظومة اعلاه هي واحدة من منظومات حماية المغذيات ذات السلك المرشد المتعددة والموجودة . الجزء الثاني من هذا الكتاب يعطي النظرية العامة لمثل هذه المنظومات وبناقش المنظومات التي لاتحتوي على الاسلاك المرشدة مثل منظومات الممانعة (المسافة) والمنظومات المحملة المستخدمة لخطوط النقل المعلقة الطويلة.

المراجع

ATABEKOV, G. I. 1960. *The relay protection of high voltage networks.* Pergamon, London.

BUCKINGHAM, H. & PRICE, E. M. 1966. *Principles of electrical measurements.* English Universities Press, London.

ENGLISH ELECTRIC Co. 1966. *Applications guide to protection.* English Electric Co., Stafford, England.

FROST-SMITH, E. H. 1966. *The theory and design of magnetic amplifiers.* Chapman and Hall, London.

JENKINS, B. D. 1967. *Introduction to instrument transformers.* Newnes, London.

MASON, C. R. 1956. *The art and science of protective relaying.* Chapman and Hall (Wiley), London.

MATHEWS, P. 1955. *Protective current transformers and circuits.* Chapman and Hall, London.

SHOTTER, G. F. and TAGG, G. F. 1960. *Induction type integrating meters.* Pitman, London.

WARRINGTON, A. R. VAN C. 1962. *Protective relays.* Chapman and Hall, London.

BRITISH STANDARDS:

142. *Electrical Protective Relays.*

3938. *Current Transformers.*

3950. *Electrical Protective Systems for A.C. Plant.*

88. and 2692. *Fuses.*

I.E.E. Conference Publication No. 125, 1975, 'Developments in power-system protection'.

مسائل

ملاحظــــة : الأسئلة التي تخص الحماية ذات الزمن المتدرج والتي تستخدم مرحلات نوع I.D.M.T.L. تفرض أن منحني خواصها مبين في الشكل 9.5 وان تنظيمات المأخذ المتيسرة هي تلك التي اعطيت ضمن هذا الكتاب في الفقرة 9.4.2 .

1 . محول تيار يعمل بتردد 50 هرتز له ابتدائي ذو 20 لفة وثانوي ذو 60 لفة والمقطع العرضي الصافي للب الحديد هو 8·0 سم^2 . تيار الثانوي هو5·0أمبير . ممانعة العبء والممانعة التسربية للملف الثانوي متساويتان ومقدارهما (0·7+j 0·4) أوم . الفيض في اللب هو $\Phi/0^\circ$. أما تيار المغنطة المطلوب في الملف الابتدائي لينتج هذا الفيض اذا كان الثانوي مفتوح الدائرة فسوف يكون $0{\cdot}60\underline{/45^\circ}$ أمبير . احسب كثافة الفيض في اللب وخمن خطأ زاوية الطور ونسبة الخطأ للمحول .
(I.E.E.) (الجواب : 0·377 بيكاتسلا و 0·59 ، $-3{\cdot}72^\circ$)

2 . اذا كان تيار الثانوي لمحول تيار 50 هرتز هو 3·0 أمبير والممانعة الكلية لدائرة الثانوي هي (0·60+j 0·45) أوم . وكان عدد لفات الابتدائي 4 ولفات الثانوي 40 والمقطع العرضي الصافي لمعدن اللب هو 10·0 سم^2 . فاحسب ذروة كثافة الفيض في اللب .
تحت هذه الظروف يشمل تيار الابتدائي تيار مغنطة اللب وهذا التيار يتألف من مركبة متفاعلة صافية مقدارها 0·20 أمبير . ومركبة فقد لب مقدارها 0·15 أمبير . جد النسبة الحقيقية وخطأ زاوية الطور .
(I.E.E.) (الجواب : 0·254بيكاتيسلا ، 10·08 ، 0·132)

3 . محول تيار ذو ابتدائي قضيبي له 300 لفة على ملفه الثانوي . مقاومة ومفاعلة دائرة الثانوي هما 1·5 أوم 1·0 أوم على التوالي (وهذه تشمل مقاومة المحول ومفاعلته التسربية) . فاذا مر تيار مقداره 5 أمبير في دائرة الثانوي وكانت القوة الدافعة المغناطيسية اللازمة هي 100 أمبير–لفات وفقد الحديد 1·2 واط . فجد نسبة الخطأ وخطأ زاوية الطور .
(I.E.E.) (الجــواب : ‎−5·92%‎ ، ′2·3)

4 . محول تيار غير معوض ذو ابتدائي قضيبي له نسبة اسمية مقدارها 1000/5 أمبير . وعندما يجهز هذا المحول تياراً قدره 5 أمبير الى مرحل يكون عبء المرحل (1·4+j 2·45) أوم وممانعة الثانوي هي 3·5+ j 0·35 أوم .

والأمبير لفات اللازمة للمغنطة هي 95 تيار لفات فقد اللب يكون 47·5 امبير . خمن خطأ التيار . وخطأ الطور ولفات التعويض اللازمة لتقليل خطأ التيار الى أدنى ما يمكن (افرض ان المعلومات ثابتة) .

(L.C.T.) (الجـــواب : -8·43%, 3·1°, 17 − لفات)

5 . قابلو ABC ثلاثي الطور . 11 ك . ف مغذى من A . له مستويات عطل ثلاثة أطوار خلال ظروف التحميل الأقصى مقدارها 250 , 225 , 200 MVA عند A , B وكذلك C على التوالي (مسندة الى 11 ك . ف) . وقاطع الدورة 11 ك . ف الموجود عند C يسيطر على محول قدرة 11 000/415-V، 1000-kVA عند C أيضاً هو من النوع الذي يعمل مباشرة مع مصاهر تحديد زمن والتي يمكن اعتبارها تنصهر بزمن مقداره 0·1 ثانية لعطل 200 MVA على جهة الفولتية العالية للمحول . عند B في القطاع BC وكذلك عند A في القطاع AB نصبت محولات تيار نسبة 400/5 أمبير ومرحلات نوع I.D.M.T.L . افرض نطاقاً زمنياً مميزاً مقداره 0·5 ثانية وان تنظيمات المأخذ للمرحل تكون بحيث لعطل ثلاثي الطور مباشر على الطرف البعيد للمرحل يجب أن يكون مضاعف تنظيم المأخذ للمرحل أقل من 20 بحد صغير قدر الامكان . احسب تنظيمات المأخذ ومضاعفات تنظيم الزمن للمرحلات عند B وعند A . واذا كانت الاحمال القصوى للجزئين AB , BC هي 2 MVA , 1 MVA على التوالي . المطلوب التأكد من أن الحماية سوف لا تعمل خلال ظروف الحمل القصوى .

(L.C.T.) (الجـــواب : 150% , 0·258 , 175 % , 0·452)

6 . افرض أن الدائرة والأجوبة المعطاة في السؤال 5 على ما هي عليه ولكن مع مستوى عطل ادنى ثلاثي الطور لحمل يتغذى من عند A يعادل $\frac{3}{4}$ قيمة اقصى مستوى عطل الحمل . احسب مستويات العطل الثلاثي الطور عند B وكذلك عند C ونطاق الزمن المميز بين المرحلات عند A وعند B وعلق على الجواب الأخير .

(L.C.T.) (الجـــواب : 173·2 , 158 MVA ; 0·564 ثانية)

7 . اذا كانت الدائرة في السؤال السادس تغذى بوساطة محول 33/11 ك . ف مربوط بشكل مثلثي نجمي مؤرض بمقاومة بحيث أن مستوى عطل الارض هو 2000 أمبير على جميع النقاط لمجمل طول القابلو ABC . افرض أن المرحلات نوع I.D.M.T.L. مربوطة لتكون ثلاثة مرحلات للتيار المفرط مع

التنظيمات المعطاة في جواب السؤال الخامس . وافرض أيضا ان المصهر ينصهر في 0·1 ثانية . احسب أنطقة الزمن المميز بين الحماية عند B والحماية عند C وكذلك بين A و B .

(L.C.T.) (الجـــواب : 1·37 ثانية ، 1·42 ثانية) .

8 . افرض أن الدائرة والبيانات المعطاة في السؤال 7 أعلاه على ما هي عليه ولكن المرحلات نوع I.D.M.T.L الآن ربطت بحيث أن اثنين منها كانا مرحلي تيار مفرط والآخر مرحلاً لعطل أرضي . وان الأخير له مضاعفات تنظيم مأخذ أقل من 20 بنطاق صغير قدر الامكان . احسب تنظيمات المأخذ وتنظيمات الزمن لمرحلات عطل أرضي عند B و A لتعطي نطاق مميز قدره 0·5 ثانية بين أجهزة الحماية . قارن بين هذا النطاق (0·5 ثانية) وذلك الذي في السؤال 7 .

(L.C.T.) (الجـــواب : 30%), 0·251, 30% ; 0·461)

9 . مغذ –محول AB مغذى عند A بفولتية 33ك . ف حيث يكون مستوى العطل ثلاثي الطور 1000 MVA (عند 33 ك . ف) . والحماية عند الطرف A تحتوي على محولات تيار 500/5 أمبير ومرحلات للتيار المفرط نوع I.D.M.T.L . والمحول عند الطرف B مقنن عند 20 MVA , 33/11 ك . ف . ومربوط بشكل مثلثي / نجمي مؤرض بمقاومة ويكون هذا المحول معرضا لزيادة تيار بنسبة 30% وله ممانعة تسربية قدرها 10 % على أساس قيمه المقننة . أما ممانعة القابلو ذي 33 ك . ف . فمن الممكن اهمالها . والحماية على مغذ خارج ذي فولتية 11 ك . ف يحتوي على محولات تيار 400/5 أمبير ومرحلاتٍ تيار مفرط نوع I.D.M.T.L تنظيمات مآخذها 150 % وتنظيمات زمن 0·4 . لعطلات ثلاثية الطور . احسب مستوى العطل مقدراً بالـ (MVA) عند قضيب التوزيع ذي فولتية 11 ك . ف وزمن التشغيل للحماية . وكذلك تنظيم المأخذ للحماية المستخدمة في 33 ك . ف التي سوف تبقي على مضاعف تنظيم المأخذ أقل من 20 بنطاق صغير قدر الامكان . وكذلك مضاعف تنظيم الزمن لها ليعطي زمناً مميزاً مقداره 0·5 ثانية مع المرحلات المستخدمة في 11 ك . ف . تأكد من أن المرحلات في 33 ك . ف سوف لا تعمل عندما يكون المغذي محملاً بأقصى حمل .

(L.C.T.) (الجـــواب : 200 MVA , 0·932 ثانية ; 150% , 0·281)

10 . قضيب توزيع 11 ك . ف يغذى بمغذيين مزدوجين متماثلين ومركب على كل منهما مرحل حماية 1000/5 أمبير نوع I.D.M.T.L له تنظيمات

تيار ومأخذ مقدارها 0·4 . 150 % . يخرج منه مغذ مركب عليه مرحل حماية من النوع نفسه المذكور أعلاه ولكن ببيانات 400/5 أمبير و 0·3 , 175 % . المحطة الثانوية تكون مصدراً راسخاً (قوياً) لـ 25 MVA اشرح معنى هذه العبارة . احسب نطاق الزمن لعطل ثلاثي الطور 250-MVA بين المرحلات في حالة (أ) كلا المغذيين الداخلين لقضيب التوزيع في حالة تغذية . (ب) أحد المغذيين يغذي القضيب فقط . بيّن أن الحماية الموجودة على مغذ داخل واحد فقط (الآخر في حالة فتح) سوف لا تشتغل عندما يكون الحمل 25 MVA .

(L.C.T.) (الجـواب : 1·2 , 0·61 ثانية)

11 . منوب نجمي الربط قدرة 30-MW (37·5-MVA) فولتيته 33 ك . ف محمي بنظام التيار الدوار (التيار المتوازن) باستعمال محولات تيار 600/1 أمبير ومرحلات (بدون انحياز) منظمة لتشتغل عند 10 % من تيارها المقنن (1 أمبير) (أ) اذا كانت مقاومة التأريض 90 % منسوبة الى تقنين الماكنة . فخمن النسبة المئوية للملفات الساكن غير المحمية ضد عطل أرضي (ب) اذا كان المطلوب حماية 90 % من الملف . فخمن قيمة مقاومة التأريض المطلوبة بالاوم وكذلك بنسبة محسوبة لتقنين الماكنة .

(L.C.T.) (الجـــواب : 8·22% ; 8·31 أوم ,109·3%)

12 . نقطة محايد منوب ذي فولتية 10 000 ف محمية بمنظومة التيار الدوار المتوازن أرضت خلال مقاومة مقدارها 10 اوم . ونظم مرحل الحماية ليشتغل عندما يكون التيار الخارج عن التوازن في الأسلاك المرشدة أمبيراً واحداً . حيث كانت هذه الأسلاك مربوطة الى ملفات الثانوي لمحولات تيار نسبة 1000/5 أمبير ماالنسبة المئوية من الملف لكل طور من الساكن التي تكون محمية ضد عطل أرضي له ممانعة صفر. وما القيمة الدنيا لمقاومة التأريض التي يجب استخدامها لتقوم بحماية 90 % من ملفات كل طور ؟ .

(الجـــواب : 65·5 , 2·9 أوم)

13 . محول قدرة 30-MVA , Yd1 , 132/33 ك . ف مؤرض مباشرة مثلثي الربط محمي بنظام التيار الدوار ومغذى بالفولتية من جهة الـ 33 ك . ف . اذا كان تقنين التيار الابتدائي لمحول التيار الموجود على جهة الفولتية العالية 150 أمبير . فاحسب نسب محول التيار الضرورية لاستعمالها مع مرحلات مقننة لأمبير واحد . اذا حدث عطل ارضي مقداره 1000 A على طرف واحد لخط الملف 132 ك . ف (أي ضمن القطاع المحمي) . فجد التيارات في كل جزء

لكل سلك مرشد وكذلك في ملفات المرحل . افرض أنه لا توجد تغذية داخلة من جهة منظومة الـ 132 ك . ف .

(L.C.T.) (الجـــواب : 600/1,150/0·577 أمبير ; 3·86 أمبير)

14 . اعطيت المعلومات والأجوبة في السؤال 13 واعطيت كذلك المفاعلة التسربية للمحول ومقدارها 10٪ منسوبة الى تقنينه . وكذلك كانت مفاعلتا التتابع الموجب والتتابع السالب للمصدر ذي الفولتية 33 ك . ف متساويتين . فاحسب تيار العطل اذا حدث عطل طور الى طور عبر طرفي الـ 132 ك . ف (ضمن القطاع المحمي) . واحسب كذلك التيارات في الأسلاك المرشدة والمرحلات .

(L.C.T.) (الجـــواب : 775, 2·98 , 5·96 أمبير)

15 . محول قدرة 50-MVA، 66/33 ك . ف . ربطه مثلثي / نجمي (مؤرض بمقاومة) ومحمي بوساطة منظومة التيار الدوار الشاملة . ونسبتا محول التيار لكل من الفولتية العالية والفولتية الواطئة 600/5 أمبير 1200/2·89 أمبير . والمرحلات بدون انحياز تكون منظمة عند 20٪ من تيارها المقنن (5 أمبير) احسب تيار العطل لكل من العطلات التالية : ثلاثي الطور وطور الى طور وطور الى ارض عند (أ) اطراف الـ 33 ك . ف . (ب) منتصف ملف الـ 33 ك . ف . افرض أن المرحل يكون على النقطة التي يحدث عندها الالتقاط .

(L.C.T.) (الجـــواب (أ)240, 208, 416 ; (ب)480, 416, 832 أمبير) .

16 . للمعلومات الواردة في السؤال 15 نفسها . خمن النسبة المئوية من ملف الـ 33 ك . ف غير المحمي ضد اعطال التأريض الداخلية . افرض أن مقاومة التأريض لها قيمة مقدارها 100٪ على أساس تقنين المحلول . وافرض كذلك انه ليست هناك تغذية آتية من جهة منظومة الـ 33 ك . ف . ولتحسين خطة الحماية اضيفت منظومة حماية عطل أرض محددة الى ملف الـ 33 ك . ف . أي بربط ثلاثة محولات تيار في خطوط 33 ك . ف مربوطة ربطاً استبقائياً ومحول تيار واحد في المحايد . جميع هذه المحولات لها نسبة مقدارها 800/5 أمبير . ربطت بوصفها منظومة حماية التيار الدوار باستخدام مرحل واحد منظم عند 20٪ على أساس تياره المقنن ومقداره 5 أمبير . خمن النسبة المئوية في ملف الـ 33 ك . ف غير المحمي ضد اعطال الأرضي .

(L.C.T.) (الجـــواب : 68·8 ,18·3٪)

17 . محول قدرة 25-MVA , 132/33 ك . ف . مربوط بشكل نجمي (مؤرض مباشرة) / مثلثي محمي بصورة شاملة بمنظومة تيار دوار بدون انحياز . ونسبة

محول التيار على جهة الفولتية الواطئة هي 600/1 امبير وتنظيم المرحل هو 40 % من تياره المقنن البالغ 1 أمبير . اذا كان ربط نقطة التفرع النجمي الى الأرض الحقيقية له مقاومة مقدارها 5 اوم . فخمن النسبة المئوية من ملف الفولتية العالية المحمي ضد اعطال ارض داخلية : افرض عدم وجود تغذية آتية من منظومة 132ك . ف وان مقاومة الأرض هي الوحيدة التي تقوم بتحديد تيار العطل .
(L.C.T.) (الجـــواب : 91·7%)

18 . تم الاقتراح بتنفيذ حماية تيار دوار شاملة على محول تقنينه 1000 kVA 11 000/415 ف . مربوط بشكل مثلثي / نجمي (مؤرض مباشرة) باستعمال مرحلات تقنينها أمبير واحد .
توجد محولات تيار لها تيارات مقننة للابتدائي كالآتي : 50 , 60 , 75 , 1600 , 2000 أمبير . اختر نسب محولات التيار الأكثر ملائمة على أساس أقل خطأ عندما يعبر عنه بكسر من التيار الابتدائي المقنن لمحول التيار . اذا كانت x مقدار الكسر العددي من الملف 415 ف غير المحمي ضد اعطال الارضي . وكانت S تنظيم المرحل (بدون انحياز) معبراً عنها بنسبة مئوية من تيارها المقنن وكذلك R المقاومة بالاوم بين نقطة التفرع النجمي والأرض الحقيقية . بين أن $x^2/RS = 0{\cdot}115$. افرض وجوب حماية نصف الملف ذي 415 ف في الأقل . وان أصغر تنظيم موجود للمرحل هو 20 % . برهن على أن R يجب أن تكون أقل من 0·1087 أوم .
(L.C.T.) (الجـواب 75/1 , 2000/0·577 أمبير)

19 . محول جمع له أطراف ابتدائي مؤشرة كالآتي $P1, P2, P3, P4$. وعدد اللفات بين ازواج من الأطراف $P1–P2$ $P2–P3$ ، $P3–P4$ هي 8 ,4 ,4 على التوالي . والثانوي له 10 لفات . تم تركيب مغذ ثلاثي الطور له أطوار R, Y, B مع محولات تيار نجمية الربط ذات 400/5 أمبير . ربطت كذلك الأطراف $P1, P2, P3$ على التوالي مع محولات التيار في الأطوار R, Y, B على التعاقب وربط الطرف $P4$ الى نقطة التفرع النجمي للمحولات المذكورة . فاذا كانت التيارات في كل من الأطوار R, Y, B والتي تسري من المصدر هي على التوالي : 0 للطور R و $1000/100°$ (للطور Y) و $900/230°$ (للطور B) أمبير وكان محول الجمع مقصور الدائرة ، فاحسب التيار في الدائرة القصيرة .
(I.E.E.) (الجواب : 11·52 أمبير)

20 . اذا كانت مجموعتان من محولات الجمع ومحولات التيار من النوع المذكور في السؤال 19 تؤلف منظومة حماية وحدية على جهتي مغذٍ . واذا كان التنظيم لعطل أرضي داخلي على الطور B هو 60 % (من 5 أمبير) . فاحسب تنظيمات اعطال الارض التي يجب عملها على الطورين R و Y . لاعطال ارض عبر الاطوار RY , YB , BR وكذلك لعطل ثلاثي الطور .

(L.C.T.) (الجـواب : 30 ,40 ,120 ,120 ,60 ,277 %)

21 . أربع محولات تيار 1000/5 أمبير ربطت لتؤلف منظومة حماية عطل ارض محددة لملف محول قدرة نجمي الربط (كما موضح في السؤال 16) . ممانعة الثانوي لكل محول تيار هي (2+j 0) اوم ؛ وقد ربطت محولات التيار على قاطع الدورة متقاربة من بعضها بحيث أن مقاومة الأسلاك التي تربط هذه المحولات على التوازي يمكن اعتبارها مهملة . مقاومة الدارة للمرشد الذي يربط محولات التيار ذات الربط الاستبقائي هذه الى المحايد هي اوم واحد المرحل المربوط عبر مركز الدارة المرشدة له تنظيم تيار مقداره 20 ملي أمبير وله مقاومة اقرار داخلية متغيرة مضبوطة على قيم الفولتيات عند اطراف المرحل ضمن قيمة تنظيم التيار . عندما تكون قيمة هذه المقاومة كلها خارج الدائرة فانه يقرأ 15 فولت . احسب مقاومة المرحل. اذا اريد من منظومة الحماية هذه ان تكون مستقرة الى حد تيار عطل ارضي نافذ مقداره 12٫5 كيلوأمبير . فخمن تنظيم الفولتية للمرحل (افرض ان ليس هناك عامل امان) وكذلك مقدار مقاومة الاقرار بالاوم . ومع تنظيم الفولتية هذا فاذا كان المرحل على نقطة الاشتغال لعطل أرضي داخلي (مغذى من جهة ابتدائي محول القدرة فقط) فاحسب قيمة تيار العطل الأدنى هذا مقدراً بالنسبة المئوية من التيار المقنن لابتدائي محول التيار . افرض ان كل محول تيار يأخذ تيار اثارة قدره 60 ملي امبير لفولتية ثانوي مقدارها 156٫2 ف .

(L.C.T.) (الجـواب : 750 اوم , 156٫2 فولت , 7٫06 كيلواوم , 5٫2 %)

الملحق 1

نظام نسبة الوحدة THE PER-UNIT SYSTEM

تعرف قيمة نسبة الوحدة لأية كمية بأنها النسبة لتلك الكمية الى قيمة كيفية يتم أختيارها بحيث تمتلك الأبعاد نفسها وتدعى بالقيمة الأساس . لذا فأن قيمة نسبة الوحدة تكون بلا أبعاد . ويشار الى القيم الأساس بالرمز السفلي b وقيم نسبة الوحدة بالرمز السفلي pu .

اذا غذى مصدر أحادي الطور فولتيته $\mathbf{V}$ تياراً مقداره $\mathbf{I}$ أمبير الى حمل ممانعته $\mathbf{Z}$ أوم وأختيرت V_b فولت بوصفها الاساس ، فأن قيمة نسبة الوحدة لفولتية المصدر تكون $\mathbf{V}_{pu} = \mathbf{V}/V_b$. وبالأسلوب نفسه قد يمثل تيار المصدر بنظام نسبة الوحدة بكونة $\mathbf{I}_{pu} = \mathbf{I}/I_b$. وعليه تكون هناك ممانعة أساسية $Z_b = V_b/I_b$ اوم . وبتطبيق نظام نسبة الوحدة على المانعة ،

$$\mathbf{Z}_{pu} = \frac{\mathbf{Z}}{\mathbf{Z}_b} = \frac{\mathbf{V/I}}{V_b/I_b} = \frac{\mathbf{V}/V_b}{\mathbf{I}/I_b} = \frac{\mathbf{V}_{pu}}{\mathbf{I}_{pu}}. \quad [\text{م } 1.1]$$

عليه فأن قيمة نسبة الوحدة تخضع لقانون أوم (لذلك تخضع أيضاً لقوانين الشبكات الأخرى جميعها) .

ان قيمة 1.0 بنسبة الوحدة لأية كمية تساوي القيمة الأساس لتلك الكمية ، وعليه تكون قيم نسبة الوحدة منسوبة الى 1.-وعند ضرب قيم نسبة الوحدة بالعدد 100 فسوف تعطي قيم النسبة المئوية (%) . والتي تكون منسوبة الى 100 على الطالب هنا أن يبين ان قانون اوم لايكون صحيحا في نظام النسبة المئوية للوحدات . لهذا السبب فان اية بيانات معطاة لمنظومة قوى بنظام النسبة المئوية من المستحسن تحويلها الى نظام نسبة الوحدة قبل الشروع بعمل أية حسابات لازمة .

أختيار قيم الأساس يكون كيفياً ويكون من الوضوح بحيث لايمكنه التأثير على النتائج النهائية لأية مسألة معينة . بما أن $Z_b = V_b/I_b$ أوم فأثنتان من هذه القيم الثلاث فقط يمكن أختيارها كيفياً علاوة على ذلك فأن الأختيار يثبت قيمة الفولت – أمبيرات الأساس $S_b = V_b I_b$ فولت – أمبيرات (وعليه تثبت القدرة والقدرة المتفاعلة أيضاً) . وقيمة الفولت – أمبيرات هذه يمكن معالجتها فنياً بنظام نسبة الوحدة حيث أن

$$\mathbf{S}_{pu} = \frac{\mathbf{S}}{S_b} = \frac{\mathbf{VI}^*}{V_b I_b} = \mathbf{V}_{pu}\mathbf{I}^*_{pu}. \qquad [\text{م } 1.2]$$

والسبب في ستخدام المترافق للتيار في [م 1.2) مبين في الملحق 4 .

يمكن تمثيل الكميات $\mathbf{V}, \mathbf{I}, \mathbf{Z}, \mathbf{S}$ الأصلية بأعداد مركبة لها زوايا طور من الأساسي لنظام نسبة الوحدة أن يحافظ على زوايا الطور هذه . عليه فأنه من الضروري الفهم أن جميع قيم الأساس تكون كميات قياسية ليست لها زوايا طور . لذلك فأن زاوية الطور لكمية ممثلة بنظام نسبة الوحدة هي زاوية طور الكمية الأصلية . ويخضع نظام نسبة الوحدة لقواعد الجبر المركب . فاذا كانت $\mathbf{Z} = R \pm \mathrm{j}\, X$ اوم (دائرة توالي مكافئة) فأن $\mathbf{Z}_{pu} = R_{pu} \pm \mathrm{j}\, X_{pu}$. اوم. واذا كانت $\mathbf{Y} = G \mp \mathrm{j}\, B$ فهو (دائرة توازي مكافئة) فأن $\mathbf{Y}_{pu} = G_{pu} \mp \mathrm{j}\, B_{pu}$
وكذلك $\mathbf{Y}_{pu} = \mathbf{Y}/Y_b$ و $Y_b = 1/Z_b$

ليس هناك شيء يدعو للغرابة حول نظام نسبة الوحدة : حيث أنه يستخدم كل يوم ويجعل بيانات عددية معينة لها معنى أكثر من أي نظام آخر في هذا المجال . فاذا كان التيار المعطى في دائرة ما 30 أمبير فأن هذه المعلومة ليست كافية بذاتها مالم يعط التيار المقنن للدائرة أيضاً . عندئذ يمكننا أن نعرف فيما اذا كانت الدائرة محملة بحمل خفيف أو بحمل مفرط . فاذا كان التيار المقنن للدائرة هو 40 أمبير عليه تكون الدائرة محملة $\frac{3}{4}$ حملها المقنن ويكون التيار 75% او 0·75 بنسبة الوحدة من التيار المقنن . وبالأسلوب نفسه فأن الطالب ملم بتمثيل الكفاءة بوصفها قيمة بالنسبة المئوية وعامل القدرة بوصفه قيمة بنسبة الوحدة ، ويعطى الأنزلاق أما بالنسبة المئوية او بنسبة الوحدة . على عكس ذلك فأن قيمة التيار معبراً عنها بنظام نسبة الوحدة تكون لامعنى لها الا اذا

أعطيت قيمة التيار الأساس أيضا . ان الأختلاف أو التمايز بين قيم الأساس والقيم المقننة سيتم التطرق اليه في المناقشات التي تأتي لاحقاً . ويعرف التيار المقنن (الحراري) لأيــة دائرة بوصفه ذلك التيار الذي يمكن للدائرةحمله بصورة مستمرة بدون تجاوز حــدود الحرارة المخصصة طبقاً للمواصفات القياسية البريطانية (B.S.S.) .

ان العلاقات الرياضية التي تكون صحيحة لنظام وحدات أعتيادي تكون أيضاً صحيحة في نظام نسبة الوحدة . ومثال على ذلك خذ دائرة توال لها ممانعة كلية $\mathbf{Z}_t$ ومركبات $\mathbf{Z}_1, \mathbf{Z}_2 ...$ فعليه تكون $\mathbf{Z}_t = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 + ...$ وبالقسمة على Z_b ينتج تحويل المعادلة الى نظام نسبة الوحدة بينما تبقى على صحتها . لذا فان

$$\mathbf{Z}_{t\,.\,pu} = \mathbf{Z}_{1\,.\,pu} + \mathbf{Z}_{2\,.\,pu} \dots$$

من الواضح ان العبارة الأولية أعلاه يجب أن تسوغ بأضافة عبارة « شريطة أن تستعمل قيمة أساس (عامة) واحدة فقط » . وهذا الشرط قد يصبح اوضح وذلك بتعويض $Z_b = V_b/I_b$ وينتج عن ذلك

$$I_b\mathbf{Z}_t/V_b = I_b\mathbf{Z}_1/V_b + I_b\mathbf{Z}_2/V_b + \dots \qquad [\ 1.3\ \text{م}\ ]$$

وهذه المعادلة تبين أن الممانعات المعبر عنها بــالاوم يجب أن تعطى بمستوى الفولتية المشترك وهو V_b (وهذه النقطة مهمة اذا ماتعلق الامر بالمحولات وسيتم التطرق اليهــا لاحقاً في هذا الملحق) ، وكذلك يجب أستعمال تيار أساس مشترك I_b أيضاً .

بصورة عامة ،تكون لمفردات محطة أو مشروع في منظومة قدرة فولتيات وتيارات مقننة مختلفة ، وعليه عند استخدام نظام نسبة الوحدة ، فانه مــن الضروري تبديلها الى قيمة مشتركة أو اساس للتيار وكذلك للفولتية ، في هذه الحالة يجب استخدام قيمة اساس عوضاً عن قيمة مقننة .

لذلك فمن المعادلة [م1.3] تكون العلاقة التي تربط القيمة الاومية للممانعة $\mathbf{Z}$ الى قيمتها بنسبة الوحدة $\mathbf{Z}_{pu}$ كما يلي

$$\mathbf{Z}_{pu} = \frac{I_b\mathbf{Z}}{V_b} \qquad [\ 1.4\ \text{م}\ ]$$

على هذا الاساس فان الممانعة مقدرة بنسبة الوحدة لمعدات عند قدرة MVA معينة ، أي أنه هناك تيار معين عند فولتية مقننة ، تكون قيمة الكسر الناتج عن قسمة فولتية ممانعة الطور على فولتية الطور المقننة الطبيعية ، عند مرور ذلك التيار .

مثـال محلول م . 1

ممانعتان مقدارهما 2 j+1 و 2 j+2 أوم مربوطتان على التوالي عبر مصدر فولتية 250 فولت . احسب الممانعة الكلية وتيار الحمل باستخدام نظام نسبة الوحدة .

الحـــل :

اختر اساس 200 فولت ، 20 أمبير (كيفياً)

مقدار الممانعة 1 بنسبة الوحدة يكون

$$1 \text{ p.u. impedance} = 200/20 = 10\,\Omega$$

عليه فان

$$\mathbf{Z}_{1.pu} = (1+j\,2)/10 = 0{\cdot}1+j\,0{\cdot}2 \text{ p.u.}$$
$$\mathbf{Z}_{2.pu} = (2+j\,2)/10 = 0{\cdot}2+j\,0{\cdot}2 \text{ p.u.}$$
$$\mathbf{Z}_{t.pu} = 0{\cdot}3+j\,0{\cdot}4 = 0{\cdot}5\underline{/53{\cdot}14^\circ} \text{ p.u.}$$
$$\mathbf{V}_{pu} = 250/200\underline{/0^\circ} = 1{\cdot}25\underline{/0^\circ}$$
$$\mathbf{I}_{pu} = (1{\cdot}25\underline{/0^\circ})/(0{\cdot}5\underline{/53{\cdot}14^\circ}) = 2{\cdot}5\underline{/-53{\cdot}14^\circ} \text{ p.u.}$$
$$I = 2{\cdot}5\times 20 \text{ A} = 50 \text{ A.}$$

ان فولتية الممانعة (IZ) / طور لماكنة ما تعرف بانها حاصل ضرب تيارها المقنن بالامبيرات وممانعتها بالاوم / طور . فاذا تم تقسيم فولتية الممانعة المعطاة بالفولت / طور على فولتية الطور المقننة فستكون النتيجة قيمة الممانعة بنسبة الوحدة ، وهذا يمكن بيانه من المعادلة (م 1.4] . لذلك فاذا كان للمولد ممانعة (تزامنية) مقدارها 200 % أو 2 بنسبة الوحدة ، فعليه وعند تيار الحمل – الكلي تكون فولتية الممانعة IZ_s ضعف قيمة فولتية الطور المقننة .

النقطة التي غالباً ما تسبب الارباك هي فيما اذا كانت ممانعة الماكنة مقدرة بنسبة الوحدة تشير الى تيارها المقنن أو الى أية قيمة كيفية اختيرت أساساً للتيار ، والاثنان يمكن استعمالهما لكن الذي يعطى هو الذي يستعمل واذا لم يعط احدهما فانه من المعتاد استخدام التيار المقنن باعتبار ان هذه الكمية هي الكمية المعروفة دائماً .

من فوائد استخدام نظام نسبة الوحدة انه لو أخذ نوع معين من أنواع المكائن كأن يكون منوباً بقطبين غير بارزين ، فان ممانعته بالاوم / طور تتغير على مدى واسع يعتمد على تقنينه . ولكن عندما يُعبّر عن هذه الممانعة بنظام نسبة الوحدة مسندة الى تقنينها الحـــراري فانها ستتغير على مدى أصغر بكثير وعليه تكون غالباً قيمة ثابتة (قياسية) .

يمكن تطبيق نظام نسبة الوحدة على الدوائر الثلاثية الطور كذلك . والطريقة الأكثر بساطة ، للدوائر الثلاثية الطور المتوازنة ، هي ان نستعمل القيم النجمية لكل طور (خط الى محايد) للكميات الاصلية جميعاً والكميات الاساس . وعند التعامل مع دوائر متوازنة ثلاثية الطور فانه من الشائع افتراض ان هذه الدوائر مربوطة على شكل نجمي ، الا اذا ذكر خلاف ذلك . أي ان الممانعات تأخذ تياراً عند فولتية خط الى محايد .

ان قيمة نسبة الوحدة لفولتية خط الى خط تساوي قيمة نسبة الوحدة لفولتية الخط الى المحايد . وقيمة الفولت – امبيرات للاطوار الثلاثة المعبر عنها بنسبة الوحدة تساوي قيمة الفولت أمبيرات بنسبة الوحدة للطور الواحد . على شرط انِ تشكل قيم الاساس دائماً منظومة ثلاثية الطور ومتوازنة . ان هذا يعني كون فولتية الخط الاساس تساوي $\sqrt{3}$ × فولتية الاساس / الطور . وبنظام نسبة الوحدة فان الفولت أمبيرات (فيما اذا كانت للاطوار الثلاثة أو لطور واحد) تساوي حاصل ضرب الفولتية (فيما اذا كانت الى خط أو الى طور) مع التيار وعليه سوف لا تكون هناك معاملات مثل 3 و $\sqrt{3}$.

ان نظام نسبة الوحدة يعتبر نظام وحدات منسجماً كلياً ويكون وافياً لجميع صيـغ الدوائر الكهربائية الاعتيادية . عليه فاذا ما تم اختيار كميات (فقط لتكونا أساساً بصورة كيفية فان جميع الكميات الاساس الاخرى يمكن اشتقاقها من هاتين الكميتين المعينتين . وقد تكون هاتان الكميتان هما قدرة الاطوار الثلاثة MVA وفولتية الخط ك . ف (حيث انهـــا غالباً ما تعطى على لوحة التقدير لاي ماكنة) ولكن الكميات الاساس يتم اختيارها لتكون القيم الطورية لها ، أو قد تأخذ القدرة للاطوار الثلاثة MVA مع فولتية الطور فقط .

عليه فاذا أخذت القيم الاساس 100 MVA (للاطوار الثلاثة) عند فولتية خط 132 ك . ف فان

كيلوفولت / طور $1\ \text{p.u.} = 132/\sqrt{3} = 76{\cdot}21\ \text{kV}$ فولتية

كيلوأمبير $1\ \text{p.u.} = 100/(\sqrt{3} \times 132) = 0{\cdot}4373\ \text{kA}$ تيار

$1\ p.u.$ ممانعة $= 76{\cdot}21/0{\cdot}4373 = 174{\cdot}3\ \Omega/$ طور

يمكن اعادة كتابة المعادلة [م 1.4] كالاتي

$$Z_{pu} = \frac{I_b Z}{V_b} = \frac{(3V_b I_b \times 10^{-6})Z}{(\sqrt{3}\ V_b \times 10^{-3})^2}$$

$$= \frac{(\text{MVA الاساس للاطوار الثلاثة})\ Z}{(\text{فولتية الخط ك.ف الاساس})^2} \qquad [\text{م } 1.5]$$

هذه الصيغة تربط الممانعة الاومية الى قيمتها بنسبة الوحدة بدلالة قيمتي الاساس الاعتياديتين . ولمولد له ممانعة أومية ثابتة فأنه ينتج من تطبيق المعادلة [م 1.5] اعلاه ان

$$Z_{pu} \propto \frac{\text{ال MVA الاساس للاطوار الثلاثة}}{(\text{فولتية الخط ك.ف الاساس})^2} \qquad [\text{م } 1.6]$$

عليه فاذا ما أعطيت ممانعة الماكنة بنظام بنسبة الوحدة نسبة الى تقنينها الحراري فانه من الممكن تحويلها الى أية قيمة اساس باستخدام العلاقات المذكورة في اعـــلاه .

مثال م . 2 محلول

منوب ثلاثي الطور مقنن عند 50 MVA و 12·8 ك.ف له مفاعلة طور (تزامنية) مقدارها 2·0 p.u. على تقنينها الحراري. يجهز خطاً علوياً معلقاً طوله 5 كيلومترات وكل طـــور منه له ممانعة $0{\cdot}51\ j + 0{\cdot}22$ أوم/كيلومتر . احسب الممانعة الكلية على اساس مقداره 100 MVA (للاطوار الثلاثة) وفولتية 11 ك.ف .

الحـــل :

$$\text{تيار الاساس} = \frac{100 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 11\,000} = 5260\ \text{A.}$$

$$\text{ممانعة الخط بنظام نسبة الوحدة} = \frac{5260 \times 5(0{\cdot}22 + j\,0{\cdot}51)}{11\,000/\sqrt{3}}$$
$$= 0{\cdot}91 + j\,2{\cdot}11 \text{ p.u.}$$

ومن المعادلة [م *1.4*] تكون مفاعلة المنوب

$$= j\,\frac{12\,800}{\sqrt{3}} \times 2{\cdot}0 \Big/ \left(\frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 12\,800}\right) = j\,12\,800^2 \times 4 \times 10^{-8}\ \Omega.$$

ومفاعلة المنوب بنسبة الوحدة عند ,100 MVA و11 ك.ف هي

$$= j\,\frac{12\,800^2 \times 4 \times 10^{-8} \times 5260}{11\,000/\sqrt{3}} = j\,5{\cdot}42 \text{ p.u.}$$

والممانعة الكلية عند ,100 MVA و 11 ك.ف تكون
(بنسبة الوحدة) $0{\cdot}91 + j\,7{\cdot}53$ p.u.

ينصح الطالب بتجنب حفظ معادلات غير تلك المعادلات التي تعطي العلاقات المبدئية والاساسية (حيث ان هذا يؤدي الى تقليل احتمال خطر الوقوع في الخطأ) ولهذا السبب فان [م *1.4*] قد تم استعمالها في المثال م. 2 بدلاً من [م*1.5*] . من الجدير ملاحظته على اي حال ان المهندسين اعتادوا على جعل الحسابات الخاصة بمكان بحيث تقلل الجهد اللازم باستخدام علاقات معينة اخرى. ومثال على ذلك هو أن [م *1.5*] تعطي مفاعلة المولد $j\,2{\cdot}0 \times (100/50) \times (12{\cdot}8/11)^2 = j\,5{\cdot}42$. ومن [م *1.4*] على الطالب ان يبين فيما اذا كانت مقاومة ماكنة 1 % مقدرة بتقنينها الحراري فان الفقد I^2R عند الحمل – الكلي هو 1 % من تقنينة بالفولت – أمبير (VA) ان الفائدة الرئيسية من استخدام طريقة نسبة الوحدة في تحليل منظومة قدرة تظهر عندما تحتوي المنظومة على محولات . وقد يتضمن التحليل باستخدام الممانعات الاومية عن نقل الممانعات خلال المحولات باستعمال مربع نسبة – اللفات حتى تكون جميع الممانعات منسوبة الى مستوى مشترك في الفولتية . عندما يتم حساب التيار في ذلك المستوى من الفولتية (لاية ظروف معينة) فان ذلك التيار يجب عندها نقله خلال المحولات باستخدام معكوس نسبة اللفات وذلك لايجاد التيار عند اي مستوى آخر من الفولتية .

الان سوف نبين ان قيمة ممانعة بنسبة الوحدة تكون متساوية على جهتي محول ذي ملفين ، وبالتشابه تكون قيمة التيار بنسبة الوحدة متساوية ايضاً على جهتي المحول نفسه شريطة ان تكون القيم الاساس على جهتي المحول منسوبة بصورة ملائمة الى فعله . فاذا اشرنا بالرمز السفلي p الى جهة الابتدائي والرمز السفلي s الى جهة الثانوي عليه فاذا عطيت V_{bp} و I_{bp} بوصفها قيم اساس على جهة الابتدائي عندئذ تكون القيم الاساس على جهة الثانوي (افرض للسهولة محولاً احادي الطور) كالاتي

$$\left.\begin{aligned} V_{bs} &= V_{bp}\times(N_s/N_p) \\ I_{bs} &= I_{bp}\times(N_p/N_s) \end{aligned}\right\}. \qquad [\text{م } 1.7]$$

واذا كانت $\mathbf{Z}_p$ هي الممانعة الاومية للملف الابتدائي فان قيمتها بنظام نسبة الوحدة تكون

$$\mathbf{Z}_{p\cdot pu} = I_{bp}\mathbf{Z}_p/V_{bp}.$$

وبالاسلوب نفسه فان

$$\mathbf{Z}_{s\cdot pu} = I_{bs}\mathbf{Z}_s/V_{bs}.$$

وعندما تنسب ممانعة الثانوي الى الملف الابتدائي فستكون الممانعة الكلية للمحول $\mathbf{Z}_p+\mathbf{Z}_s(N_p/N_s)^2$ أوم . وان الممانعة بنسبة الوحدة للمحول كله على جهة الابتدائي تكون .

$$\begin{aligned} &= \frac{I_{bp}}{V_{bp}}(\mathbf{Z}_p+\mathbf{Z}_s(N_p/N_s)^2)\ \text{p.u.} \\ &= \frac{I_{bp}}{V_{bp}}\mathbf{Z}_p+I_{bp}\frac{N_p}{N_s}\times\frac{N_p}{N_sV_{bp}}\times\mathbf{Z}_s\ \text{p.u.} \\ &= \frac{I_{bp}\mathbf{Z}_p}{V_{bp}}+\frac{I_{bs}\mathbf{Z}_s}{V_{bs}}\ \text{p.u.} \\ &= \mathbf{Z}_{p\,.\,pu}+\mathbf{Z}_{s\,.\,pu}\ \text{p.u.} \end{aligned}$$

عليه فان الممانعة الكلية للمحول بنسبة الوحدة محسوبة لاي اساس من الفولتية وال MVA تكون حاصل جمع ممانعات ملفي الابتدائي والثانوي والتي تكون قيمها بنسبة الوحدة . وعليه تكون متساوية على جهتي المحول . من الواضح ان ممانعة اي جهاز مربوط الى الابتدائي وله الفولتية نفسها ستكون ضمنياً مع $\mathbf{Z}_p'$. وممانعة اي جهاز مربوط الى

الثانوي ستكون ضمنياً أيضا مع $\mathbf{Z}_s$. ولاضير في ان تكون القيم الاساس معبراً عنهـا بالفولت – أمبيرات وبالفولت . حيث انه من الواضح ان الفولت – أمبيرات الاساس هي نفسها على جهتي المحول ذو – الملفين . أما مشكلة المحول الثلاثي الملف . حيث تكـون تقنينات الملفات الثلاثة ليست بالضرورة متساوية جميعها . فقد تم التطرق اليها في الفقرة 6.9 .

في تحليل منظومة قدرة باستخدام نظام نسبة الوحدة . يمكن اعتبار محول ما بوصفه ممانعة توال مكافئة ولذلك يمكن تلافي تحويلات التيار وكذلك الفولتية . النتائج النهائية للتحليل يجب ان تعطى بنظم الوحدات الاعتيادية ويتم الحصول عليها من قيم نسبة الوحدة باستخدام القيم الاساس المناظرة لمستوى الفولتية المطلوب عندها حساب هـذه القيم .

ان التحليلات اعلاه تطبق على محول احادي الطور والمحول نجمي / نجمي حيث تشير الاصطلاحات الى القيم لكل طور نجمي (خط الى محايد) . وسوف نبين الان ان قيمة ممانعـة الطور بنظام نسبة الوحدة هي نفسها اذا كان الربط نجمياً أو مثلثياً . تأمل ملف مثلثي له ممانعة مقدارها $\mathbf{Z}$ أوم / طور مربوطة الى مصدر ثلاثي الطور له فولتية خط أساساً مقدارها V_{bL} تقابل فولتية طور اساس $V_b = V_{bL}/\sqrt{3}$.

والتيار الاساس في احد الاطوار من الملف هو I_b وهذا يقابل تيار خط اساس $I_{bL} = \sqrt{3}I_b$ وكذلك

$$\mathbf{Z}_{pu\,.\,\mathrm{delta}} = \frac{I_b\mathbf{Z}}{V_{bL}}.$$

الممانعة المكافئة النجمية تكون $\mathbf{Z}/3$ أوم (انظر الملحق 2) وقيمتها بنسبة الوحدة تكون

$$\mathbf{Z}_{pu\,.\,\mathrm{star}} = \frac{I_{bL}(\mathbf{Z}/3)}{V_b} = \frac{\sqrt{3}I_b(\mathbf{Z}/3)}{V_{bL}/\sqrt{3}} = \mathbf{Z}_{pu\,.\,\mathrm{delta}}.$$

لذا فاذا عينت ممانعة محول في نظام نسبة الوحدة فانه ليس من الضروري معرفة ما اذا كانت الملفات نجمية أم مثلثية . الا في التحليل النهائي وعندما يتطلب ايجاد توزيع التيـار ضمن المحول نفسه . في حالة محول مربوط على شكل مثلثي / نجمي . فان تغير الطور بزاوية 30° يجب ان يعمل له حساب (انظر الفقرات 6.3 ، 8.3.5) .

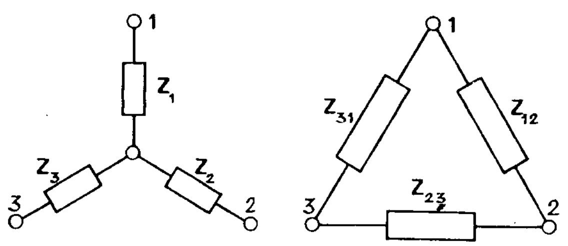
عندما تستخدم المعادلة [م 1.4 أو [م 1.5] فمن الجوهري ان تكون الكميات على جهة اليمين جميعاً معينة على جهة المحول اليمنى أيضاً .

الملحق 2

تحويل الربط النجمي الى مثلثي

STAR-DELTA TRANSFORMATION

في أي دائرة اذا تم اعطاء الاطراف الثلاثة لاية دائرة فقط (الشكل م 2.1) فان الربط النجمي للممانعات الثلاثة يمكن ابداله بربط مثلثي لهذه الممانعات وبدون التأثير على الأجزاء الباقية من هذه الدائرة . والعكس يكون صحيحاً . ان مثل هذه الممانعات يشار اليها بالممانعات المكافئة وكما في معظم نظريات الشبكات يشار اليها ايضا بالممانعات الخطية .



الشكل م 2.1 تحويل نجمي الى مثلثي

البرهان الاعتيادي على تلك المسألة يتم باحتساب الممانعات الموجودة بين ازواج الاطراف الثلاثة في كلتا الدائرتين ومساواتها بمعادلات جبرية . وينتج عن هذا ثلاث معادلات انية لثلاثة مجاهيل . عليه اذا اعطيت ممانعات الربط المثلثي الثلاث . يمكن ان نبين أن

$$\mathbf{Z}_1 = \frac{\mathbf{Z}_{12}\mathbf{Z}_{31}}{\mathbf{Z}_{12}+\mathbf{Z}_{23}+\mathbf{Z}_{31}}$$

وذلك بتصور أن كلتا الدائرتين متراكبتان . وهذه الصيغة يمكن تعميمها كالاتي

$$Z_{star} = \frac{\text{حاصل ضرب ممانعات المثلثي عن ذلك الطرف}}{\text{مجموع الممانعات حول المثلثـــي}} \qquad [\text{م } 2.1]$$

وبالاسلوب نفسه ، اذا كانت الممانعات نجمية

$$Z_{12} = Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_3} = \frac{(Z_1 Z_2) + (Z_2 Z_3) + (Z_3 Z_1)}{Z_3}$$

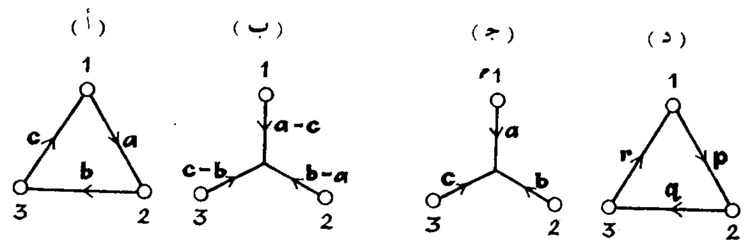
فان

$$Z_{delta} = \frac{\text{مجموع حاصل ضرب أزواج ممانعات النجمة}}{\text{الممانعة المقابلة الى طرفين اثنيـــن}} \qquad [\text{م } 2.2]$$

واذا كانت الممانعات الثلاثة متساوية فان الصيغة تختصر الى

$$Z_{star} = Z_{delta}/3. \qquad [\text{م } 2.3]$$

في الملحق.1 بين ان المعادلات اعلاه تكون صحيحة للممانعات المحسوبة بنظام نسبة الوحدة . ولكن الممانعة بنسبة الوحدة لجهاز ثلاثي الطور تكون نفسها سواء كان ربطه نجمياً أو مثلثيا



الشكل م 2.2 توزيع التيار

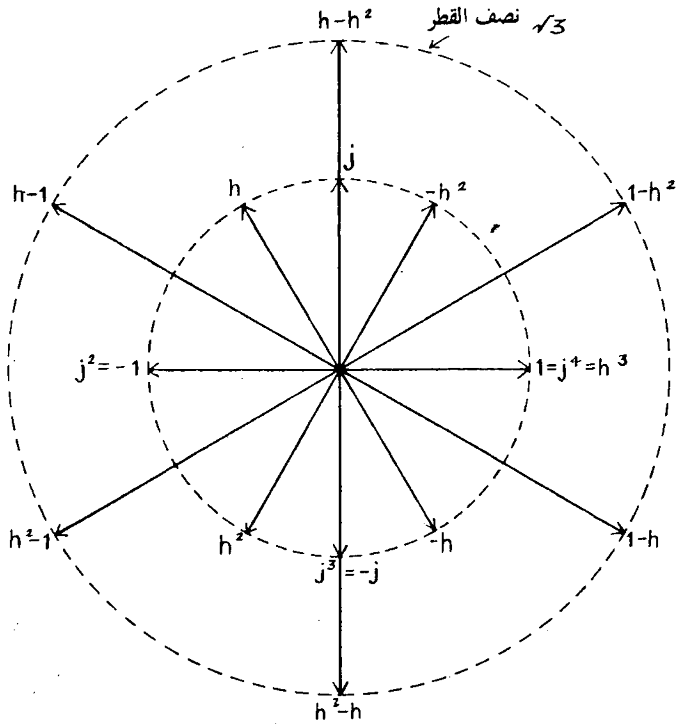
ان تحويل الربط النجمي الى ربط مثلثي يستخدم لتبسيط الشبكات المعقدة والتي غالباً ما يكون توزيع التيار فيها هو المطلوب . فاذا اعطيت تيارات المثلثي في الشكـــل م 2.2 (أ) فان توزيع التيارات في الربط النجمي المكافيء (ب) يكون واضحاً . واذا اعطي كذلك توزيع التيارات في دائرة النجم (ج) . فان تيارات الربط المثلثي يمكن الحصول عليها من العلاقات المتمثلة ب

$$pZ_{12} = aZ_1 - bZ_2$$

الملحق 3

العامل المدور – h　　h-OPERATOR

من المفروض ان يكون الطالب حسن المعرفة بالعامل j والذي يعرف بانه العامل الذي يضرب بمطاور (متجه)لكي يدوره خلال زاوية مقدارها 90° في الاتجاه الموجب (عكس اتجاه عقرب الساعة) بدون أي تغير في مقداره . على هذا الاساس يكتب j في اصطلاح الصيغة القطبية $j = 1/90°$ وفي الاحداثيات التربيعية نستطيع ان تكتب $j = 0+j1$. في الشكل م 3.1 اذا ضربت مطاوراً احادي القيمة $1/0°$ فستحركه من الوضع $+x$ على المحور السيني الى $+y$ على المحور الصادي لتعطي $j\times 1 = 1/\underline{90°}$. اذا ما تم ضرب المطاور الاخير هذا بـ j آخر فستكون النتيجة : $j\times(j\times 1) = 1/\underline{180°} = -1$: وعليه فان j يخضع للقواعد الجبرية الاعتيادية للاعداد



الشكل م 3.1 العوامل لفترات مقدارها 30°

المركبة ، يعني لضرب عددين مركبتين يتم بضرب مقداريهما وجمع طوريهما . لذلك فان$\sqrt{-1}$ = ز حيث يسمى بالعدد الخيالي استناداً الى حقيقة أنه لا يوجد عدد موجب (أو سالب) على المحور السيني والذي اذا ما ضرب بنفسه سوف يعطي **1−** .

بما ان مهندسي القدرة الكهربائية يهتمون بصورة رئيسية بالدوائر الثلاثية الطور ، فانه من الطبيعي ان تمتد الفكرة أعلاه الى عامل مدور بـ $120°$. عليه فاننا سنعرف $h = 1/120°$ وهو العامل الذي اذا ضرب بمطاور يدوره بزاوية $120°$ في الاتجاه الموجب (عكس عقرب الساعة) بدون أي تغير في مقداره . لذا فان $h^2 = 1/\underline{240°} = 1/\underline{-120°}$ وكذلك $h^3 = 1/\underline{360°} = 1/\underline{0°}$. فعليه $h = \sqrt[3]{1}$: وتنشأ ثلاثة جذور للتكعيب للقيمة واحد وهي 1 ، h h^2 . واذا ما اريد التحويل الى الاحداثيات التربيعية ينتج :

بما ان $\cos 60° = 1/2$ وكذلك $\sin 60° = \sqrt{3}/2$ فان $h = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ وكذلك $h^2 = -1/2 - j\sqrt{3}/2$ ولما كان $(1+h+h^2) = 0$ لذا يسمى هذا بالعامل عديم القيمة واذا ما ضرب باي مطاور فسوف تؤول قيمة ذلك المطاور الى الصفر . اذا كان **V** يمثل مطاوراً ما فان

$$(1+h+h^2)\mathbf{V} = \mathbf{V} + h\mathbf{V} + h^2\mathbf{V} = 0$$

التفسير الهندسي لما ورد اعلاه هوكونه مثلثاً متساوي الاضلاع والمجموع الاتجاهي لاضلاعه يكون صفرا . وبمجرد التفكير في وظيفتي العاملين j و h فانه يمكن الحصول على سلسلة من العوامل لفترات مقدارها $30°$ وكما مبين في الشكل م 3.1 . هذه العوامل تكون مهمة عند التعامل مع المركبات المتماثلة وكذلك حسابات الاعطال غير المتماثلة (الفصل الثامن) .

ان الافكار اعلاه يمكن ان تعمم . يمكننا ان نعرف عاملا ما $\mathbf{A}(\theta)$ بانه العامل الذي يضرب قيمة المطاور بالمقدار A ويزيد طوره بزاوية θ في الاتجاه الموجب . لذلك

$$\mathbf{A}(\theta) = A/\underline{\theta}$$
$$= A(\cos\theta + j\sin\theta) = A\,e^{j\theta} = A\exp(j\theta)$$

الطرق الاسية لبيان مطاور له مقدار واتجاه تعتبر من الطرق الاساسية في هذا المجال في كتب الرياضيات المعدة لاغراض التدريس .

الملحق 4

الفولت امبيرات ، القدرة والقدرة المتفاعلة

VOLT-AMPERES, POWER AND REACTIVE POWER

في اية دائرة من دوائر التيار المتناوب اذا كان $v = \sqrt{2}\,V \sin \omega t$ والتيار $i = \sqrt{2}\,I \sin (\omega t - \phi)$ فان القدرة اللحظية تعطى كما يلي :

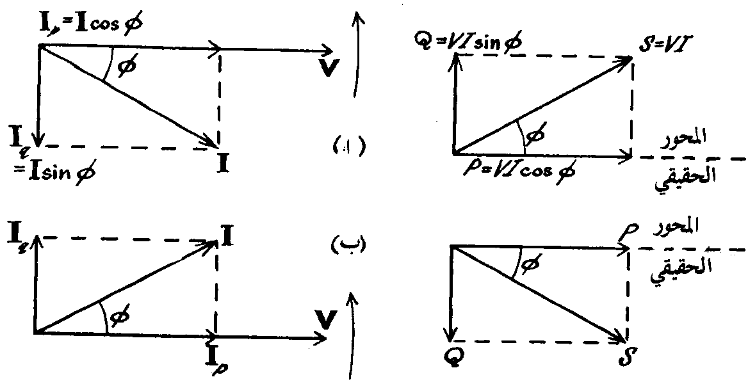
$$p = vi = VI[\cos \phi - \cos (2\omega t - \phi)]$$ واط

حيث ان V و I هما قيم ج.م.ت. وهذا يبين ان القدرة تحتوي على مركبات لها تردد مضاعف اي انها تبدل اشارتها كل نصف دورة (من التردد المضاعف) وفي اتجاه سريان الطاقة ، وان معدلها يكون صفرا اذا ماأخذ على مدى عدد من الدورات الكاملة لذلك فان معدل القدرة يكون $P = VI \cos \phi$ والمعادلة اعلاه يمكن اعادة كتابتها بالصيغة التالية

$$p = VI \cos \phi - (VI \cos \phi) \cos 2\omega t - (VI \sin \phi) \sin 2\omega t$$ واط [م 4.1]

حيث ان الحد الاول يعطي معدل القدرة P المتدفقة من المصدر الى الحمل ، والذي اذا ماضرب بالزمن فسوف يعطي الطاقة المستهلكة . اما الحد الثاني فيمثل سريان قدرة متذبذبا بتردد مُضاعف معدل قيمته صفر . واتساعه يساوي P وهذا يكون اعظم مايمكن عند عامل قدرة بقيمة واحد ويكون صفرا عند عامل قدرة صفري الحد الثالث هو ايضا تدفق قدرة متذبذب بتردد – مضاعف معدل قيمته صفر ، اما اتساعه فهو $Q = VI \sin \phi$ وهذا يعني كونه صفرا عند عامل قدرة واحد وأقصى مايمكن عند عامل قدره صفري . ان هاتين القدرتين تكونان متعامدتين مع بعضهما في الزمن .

اذا تم عد الحمل محاثة ومقاومة على التوازي كما في الشكل م 4.1 (أ) فان الفرع الذي يحتوي على المقاومة سوف يأخذ تيارا فعالا $I_p = I \cos \phi$ ويستهلك قدرة P . وسوف تتذبذب قدرة $P \cos 2\omega t$ بين المصدر وبين الفرع ذي المقاومة R ، بينما الفرع ذو المحاثة L سوف يأخذ تيارا متفاعلا متأخرا $I_q = I \sin \phi$ وستكون هناك قدرة $Q \sin 2\omega t$ تتذبذب بين المصدر والفرع ذي المحاثة L .



الشكل م 4.1 القدرة المتفاعلة (*vars*)
(أ) حمل حثي (ب) حمل سعوي

ان $Q(= VI\sin\phi)$ تدعى بالقدرة المتفاعلة (الفولت – امبيرات المتفاعلة او vars) لهذه الدائرة . وتكتب وحداتها المناظرة بصيغة VAr . ويعد الحمل RL مصبا للقدرة P ويقال عنه انه مصب للقدرة المتفاعلة المتأخرة Q(vars) . ومما يجب ملاحظته من المعادلة [م 4.1] ان Q تمثل اتساعا لقدرة تتذبذب بتردد ضعف تردد المصدر بين المصدر نفسه وبين المجال الكهرومغناطيسي للحمل الحثي . مما مر اعلاه يتبين ان المولد هو مصدر للقدرة وكذلك للقدرة المتفاعلة vars المتأخرة .

من ضمن الأتفاقيات العالمية فأن القدرة المتفاعلة المتأخرة التي تأخذها الأحمال الحثية والتي على هذا الأساس تتدفق في اتجاه القدرة الحقيقية نفسه فأنها تكون ذات قيمة موجبة .

والآن اذا فرض أن الحمل هو دائرة توازٍ RC (الشكل م 4.1 (ب)) فأنه من الواضح ان المركبة الفعالة (القدرة) للتيار I_p تبقى بالطور نفسه مع التيار المقابل في الدائرة الحثية وذلك لكون اتجاه تدفق القدرة للدائرتين واحد . لكن المركبتين المتفاعلتين للتيار تكونان في طورين متضادين ، وعليه تكون القدرتان المتذبذبتان بتردد مضاعف $Q\sin 2\omega t$ في طورين متضادين ايضا . كذلك تكون القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً . لذا فأنه يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المقابلة في طورين متضادين أيضاً . لذا فأنه

يمكن أعتبار القدرة المتفاعلة المتقدمة بوصفها قدرة متفاعلة سالبة تتدفق من المصدر الى الحمل أو بوصفها قدرة متفاعلة موجبة تتدفق من الحمل الى المصدر . لهذا السبب فأن عمل متسعة تحسين عامل القدرة المربوطة عبر حمل حتى يمكن تفسيره بالقول ان المتسعة تولد قدرة متفاعلة متأخرة التي بدورها تجهز الى الحمل نفسه ، وبذلك تقلل من الطلب على القدرة المتفاعلة المتأخرة من المصدر ذاته .

عند التعامل مع المحركات التزامنية ، فأن اتجاه الأسناد يأخذ دائماً بما يدخل الى المحرك، وهذا يعني ان المحرك يأخذ تياراً وقدرة اذا أشتغل المحرك عند عامل قدرة متأخر فسيكون مصباً للقدرة المتفاعلة المتأخرة : واذا أشتغل عند عامل قدرة متقدم فسيكون مصباً للقدرة المتفاعلة المتقدمة او يكون مصدراً للقدرة المتفاعلة المتأخرة.

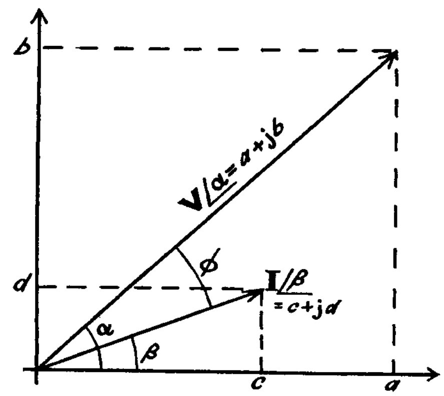
في حالة خط نقل فأن محاثة التوالي تعتبر مصباً للقدرة المتفاعلة المتأخرة مساوية الى I^2X_L حيث ان $X_L = 2\pi fL$، بينما تعد متسعة التوازي كونها مصباً لـ vars . المتقدمة (مصدر لل vars المتأخرة) مساوية لـ V^2/X_C حيث أن $X_C = 1/2\pi fC$.

من المعتاد في منظومات القدرة الأشارة دائماً الى الـ vars المتأخرة (ولايشار الى القدرة المتفاعلة المتقدمة). لذافاذا كانت محطة قدرة تولد عند عامل قدرة متأخر يقال عنها أنها تصدر الواطات وكذلك الـ vars (المتأخرة) ، بينما اذا كانت تولد عند عامل قدرة متقدم يقال عنها أنها تصدر الواطات وتستورد القدرة المتفاعلة (ان أستيراد القدرة المتفاعلة المتأخرة (الموجبة) يكون مكافئاً لتصدير القدرة المتفاعلة المتقدمة (السالبة).

الشكل م 4.2 يبين الفولتية عبر حمل ما ، وقد رسم التيار خلال هذا الحمل بأتجاهات كيفية نسبة الى مجموعة من محاور تربيعية الا أن I يتأخر عن V بزاوية قدرها ϕ .

$$\begin{aligned}
P &= VI\cos\phi = VI\cos(\alpha-\beta)\\
&= VI[(\cos\alpha)(\cos\beta)+(\sin\alpha)(\sin\beta)]\\
&= ac+bd
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
Q &= VI\sin\phi\\
&= VI[(\sin\alpha)(\cos\beta)-(\cos\alpha)(\sin\beta)]\\
&= bc-ad.
\end{aligned}$$



الشكل م 4.2 المركبات التربيعية للفولتية V والتيار I

وتفسير هذه المعادلات هو ان ac يمثل القدرة المتسببة عن مركبة الفولتية ومركبـة التيار كليهما على المحور السيني ، وبالتشابه bd على المحور الصادي وان هذه المركبات تجمع الى بعضها حسابيا : تمثل bc يضا القدرة المتفاعلة المتسببة عن مركبة تيار متأخرة عن مركبة فولتية بينما ad تمثل القدرة المتفاعلة بالنسبة الى مركبة تيار تتقدم مركبة فولتية .

قد يلاحظ منطقياً محاولة الحصول على الفولت – أمبيرات من حاصل ضرب الفولتية والتيـــار بوصفها اعداداً مركبة ، لذلك

$$(a+\mathrm{j}\,b)(c+\mathrm{j}\,d) = (ac-bd)+\mathrm{j}\,(bc+ad)$$

وهذه النتيجة تكون غير صحيحة بصورة واضحة . النتيجة الصحيحة يمكن الحصول عليها باستخدام مترافق التيار $\mathbf{I}^*$ ، في مكان التيار نفسه حيث

$$\mathbf{I}^* = I\underline{/-\beta} = c-\mathrm{j}\,d$$

لذلك فان

$$\begin{aligned}\mathbf{S} = \mathbf{VI}^* &= (a+\mathrm{j}\,b)(c-\mathrm{j}\,d)\\ &= (ac+bd)+\mathrm{j}\,(bc-ad)\\ &= P+\mathrm{j}\,Q.\end{aligned}$$

ويتفق استخدام مترافق التيار مع اصطلاح القدرة المتفاعلة المتأخرة المأخوذة باشارة موجبة عندما تتدفق الى حمل حثي في اتجاه القدرة نفسه .

ومع ان القدرة والقدرة المتفاعلة بالفولت – امبيرات ليست مطاورات الا انها تعد متجهات وذلك لكونها تمتلك اتجاهات بالنسبة الى بعضها البعض (الشكل م 4.1). لذا فلحمل حتي يكون الدخل بالفولت – أمبيرات .

$$\mathbf{S} = P + \mathrm{j}\, Q.$$

وباتخاذ فولتية الحمل مطاوراً مرجعاً ، فان تيار الحمل المقابل يكون

$$\mathbf{I} = I_p - \mathrm{j}\, I_q$$

ان طبيعة المهندسين في معاملة معظم الكميات التي تتكرر دائماً(قدرة متفاعلة متآخرة)على انها كميات موجبة ، قد ادت الى هذا التضارب الظاهري في الاشـــارة .

وطبقاً للمواصفات القياسية البريطانية B.S. 1991 الجزء 6 فان الفولت – أمبيرات يجب ان نطلق عليها « القدرة الظاهرية » .

معجم المصطلحات والتعابير الهامة

انكليزي عربـي

المصطلح بالعربية	المصطلح بالانكليزي
أمتصــاص	Absorption
تآكـل ، حـك	Abrasion
مرحل معجل (مسارع)	Accelerating relay
فعــال	Active
تعيير ، ضبــط	Adjustment
مسامحة ، مسايرة	Admittance
دفع هواء ، عصف هواء	Air – blast
قلـب (لب) هوائي	Air – core
قاطع دورة هوائي	Air circuit breaker
فجـوة هوائيـة	Air gap
عـزل هوائـي	Air insulation
دائرة تنبيـه	Alarm circuit
مكهـرب	Alive
حمل مسموح به	Allowable load
منوّب ، مولد متزامـن	Alternator
امبير – لفة	Ampere – turn
مضخـم	Amplifier
أتســاع	Amplitude
تضميـن اتساعـي	Amplitude modulation
زاويّ	Angular
ملطف ، ملدّن	Annealed
مصعد ، أنود	Anode
لادوري	Aperiodic
جهــاز	Apparatus

Apparent power	قدرة ظاهرية
Arc	قـــوس
Arc discharge	تفريغ قوســي
Arbitrary	كيفي ، أختياري
Arc resistance	مقاومـــة القـــوس
Armature	منتج ، عضو الأنتاج
Armature reaction	رد فعل المنتج
Asymmetrical	غير متماثل
Asynchronous	لامتزامن
Attenuation	تضاؤل ، توهين
Attraction	جذب ، تجاذب
Automatic	ذاتي ، طوعي ، تلقائي
Automatic reclosure	اعادة الغلق الذاتي (الغالق الذاتي)
Automatic voltage regulator	منظم الفولتية الذاتي
Auto - transformer	محول ذاتي
Auxiliary contacts	ملامسات مساعدة
Average value	قيمة متوسطة
Axis	محـــور
Balance	متزن ، متوازن
Balanced current protection system	منظومة حماية تيارات متزنة
Balancer	موازن
Band	حزمة ، نطاق
Band pass filter	مرشح امرار نطاقي
Bar winding	ملف قضيبــي
Base	قاعدة ، أساس
Base load	حمل أساس
Base voltage	الفولتية الاساس
Bias .	انحياز

Bias voltage	فولتية أنحياز
Bilateral	ثنائي الاتجاه ، ذوا أتجاهين
Binomial	ذو حدين
Bistable	ثنائي أستقرار
Block diagram	رسم تخطيطي ، مخطط كتلي
Blocking	كبح تشغيل ، تثبيت ، تقييد
Booster	معزز
Branch	فـــرع
Breakdown	انهيـــار
Burden	عبء ، حمل
Bus - bar	قضيب توزيع
Bundle	حزمة
Bundle conductor	موصل حزمي
Buckling	احديداب
Bushing	جلبة عازلة
Butt - gap	فجوة متناكبة (متقاربة مع بعضها)
Cable	قابـــلو
Coble box	صندوق قابلو
Calibration	تعيير
Capacitive reactance	مفاعلة سعية
Carrier wave	موجة حاملة
Cascade	تعاقبي
Catenary	منحنى سلسلي
Cathode	كاثود ، مهبط
Center tap	مأخذ مرُكزي (وسطي)
Characteristic	خاصية (مميز)
Charging current	تيار الشحن
Chorded	موتّر

Circulating current	تيار دوار
Circuit breaker	قاطع دورة
Clear	ازال . أجلى
Clearance	حيز الخلوص
Close coupling	تقارن محكم (دقيق)
Common	مشترك . مألوف . عام
Commutative	تبادلي
Compensation	تعويض
Component	مركبة
Complex	مركـب
Conditions	ظروف
Conductance	مواصلة
Configuration	هيئة . شكل عام .
Co - factor	العامل القرين
Contact	ملامس . تمـاس
Contact points	نقاط تلامس . ملامسات
Control circuit	دائرة سيطرة
Consumer	مستهلك
Core	قلب . لب
Core - less	عديم القلب
Core - type transformer	محول بقلب حديد
Corona	هالة
Corona discharge	تفريغ هالي
Counter current breaking	الكبح بتيار معكوس
Critical	حرج
Current - transformer	محول تيار
Cut - off	قطـع
Cycle	دورة
Damper windings	ملفات مخمدة

Dash - pot	وعاء توهين (كبح)
Data	بيانات ، معلومات
Dead load	حمل خامل (غير مكهرب)
Decomposition	انحلال
decrement	نقصان
demodulation	ازالة التضمين
Detection	كشــف
Determinant	محددة
Dielectric strength	(شدة) متانة العازل
Differential protection	حماية فرقية
Direct axis reactance	مفاعلة المحور المباشر
Directional	اتجاهي
Discrete	منفصل
Divertor	مفرع
Double circuit	دائرة ثنائية
Double winding	ذو ملفين
Droop	هابطة . منخفضة
Dummy	كاذب . وهمي
Dynamic load	حمل ديناميكي
Dynamic stability	أستقرارية ديناميكية
Element	عنصـــر
Equipment	أجهزة – معدات
Equipotential	متساوي الجهد
Earthing	تأريض
Earth fault	عطل ارضي
Earthing reactor	ملف مفاعل ارضـــي
Excessive	مفــرط – زائد
Excitation	اثارة
Exciter	مثير

Factor	عامل
Fault	عطـــل
Fault-clearance	ازالة العطل
Fault level	مستوى العطل
Fault location	مكان العطل
Feed back	تغذية خلفية
Feeder	مغذ
Ferrule	حلقة . طرف حديد
Filter	مرشح
Flash over	شرر عرضي
Flux	فيـــض
Forced oscillation	تذبذب قسري
Form	صيغة . هيئة
Frequency	تردد
Fuse	مصهر
Galvanised	مغلفن
Gap	فجوة . ثغرة
Geometri mean distance	متوسط البعد الهندسي (م.ب.ه)
Geometric mear radias	متوسط نصف القطر الهندسي (م.نق.ه)
Governor	متحكـــم
Graphical method	طريقـــةتخطيطيـــة
Grease	شحـــم
Grid	شبكـــة كبـــرى
Grid in feed	تغذية الشبكة الداخلة
High voltage	فولتية عالية
Holding coil	ملف ضبط (استمرار)
Hot rolled steel	فولاذ حار الدرفلة
	تشطط

Hunting	
Hysteresis	تخلف مغناطيسي
Imaginary	خيالـــي
impedance	ممانعـــة
impregnation	تشـــرب
impulse	نبضة . دفعة
incoming	وارد – داخل – قادح
inductive reactance	مفاعلة حثية
inherent	متلازم . ملازم . متأصل
inherent voltage regulation	انتظام الفولتية المتلازم
in phase	منطبق الطور (متحد الطور)
inrush	اندفـــاعي
inter connected	مترابطـــة
inter connector	رابط مشترك (مغذي ربط) . رابط بيني
inter lock	تواشـــج
internal fault	عطل داخلي
interpolar	الاقطاب البينية
interruption	قصم . كسر . قطع
interval	فتـــرة
inverse time lag	تأخير زمن عكسي
Junction	نقطة اتصال . ملتقى
Lag	متأخر . متخلف
Lamination	رقيـــقة
lapped	متراكب
lattice	شبكة
lay out	مـــخطط
Lead	متقدم
leakage	تسرب
Level	مستوى

limit	حد ، حافة
link	ربط ، وصيل ، تشابك
limb	فرع
load flow	سريان الحمل
loop	دارة
Making current	تيار الوصل
Margin	حد ، مقدار الفرق ، نطاق
Matching	توفيق ، موافقة
Maximm	اقصى ، أعظم
Mean value	متوسط القيمة
Mertz price protection system	منظومة حماية ميرتزبرايز
minimum	ادنى
modification	تحوير (تغير)
modulation	تضمين
Mutual	تبادلي
neqative sequence	تتابع سالب
network	شبكة
neutral	محايد
node	عقدة
nominal	اسمي
non directional	لااتجاهي
non linear	لاخطي
Notation	ترميز – رمز
Oil conservator	حافظة الزيت
Oil Immersed	مغمور بالزيت
Operating quantity	كمية (مقدار) التشغيل
Operator	عامل (مدور)
Optimum	أمثل ، أفضل
Orthogonal	متعامد
Oscillator	مذبذب

Oscillogram	راسم الذبذبات
Oscillograph	رسم تذبذبي
Outgoing	خارج – صادر
Output	خرج ، اخراج
Over head line	خط نقل علوي
Over lapping	تراكب، تشابك
over current	تيار مفرط
over load	حمل مفرط
over voltage	فولتية مفرطة
quadrature	تعامدي
parameters	معالم (معاملات وسطية)
pattern	نموذج ، شكل ، نمط
peak	ذروة
per unit	نسبة الوحدة
period	فترة
periodic	دوري
performance	اداء
permability	انفاذية
permeance	منافذة
permissible	مسموح به
phase	طور
phase angle	زاوية طور
phase comparator	مقارن طور
phase shift	ازاحة طور
phasor	مطاور
pick – up current	تيار التقاط (بدء التشغيل)
pick – up value	قيمة الألتقاط
pilot wires	أسلاك مرشدة (رائدة)
plastic clay	طين لدن
polarity	قطبية

pole	قطـب
porcelain	خزف (بورسلين)
positive sequence	تتابع موجب
power factor	عامل قدرة
prime mover	مدور أبتدائي
primary	ابتدائي
process	أجراء (معالجة)
protection zone	منطقة حماية
protection	حماية
proteative	حمائي (لأغراض الحماية)
proximity effect	التأثير التقاربـــي
pure	صاف . نقي . بحت
radial system	منظومة شعاعية
radial transmission line	خط نقل شعاعي
rated	مقنن
reactance	مفاعلة
reactive power	قدرة متفاعلة
receiver	مستقبل . مستلم
receiving end	نهاية أستلام
reference	مرجع (أسناد)
regulation	انتظام – تنظيم
relay	مرحـــل
reluctance	معاوقة مغناطيسية
remanence	مغناطيسية متبقية
resetting value	قيمة أعادة الضبط
residual	متبق.متخلف
reidually	استبقائي
restrain	كبح

ring	حلقة
ripple	تموّج
rotor	دوار
sag	تدل
salient pole	قطبً بارز
saturation	تشبــــع
saturable reactor	ملف مفاعل قابل للتشبع
search coil	ملف أستكشاف
secondary	ثانوي
self inductance	محاثة ذاتية
semiconductor	شبه موصل
semi - enclosed fuse	مصهر نصف مغلق
seperate excitation	انارة منفصلة
series trip	وسيلة أفلات على التوالي
set	طقم ، مجموعة
shaded – pole	قطب مظلل
signal	أشارة
shell–type transformer	محول مغلّف الملفات
short – circuit	دائرة قصيرة
short circuit ratio	نسبة القصر في الدائرة
shunt	مفرع (مجزيء) متوازٍ
shunt trip	وسيلة أفلات على التوازي
single–phase	أحادي الطور
skin effect	التأثير القشري
slip	انزلاق
slip ring	حلقة انزلاق
slow – break switch	اقليد بطيء القطع (مفتاح)
smoothing circuit	دائرة تنعيم
solid	مصمت ، صلد
span	بون ، اتساع ، امتداد

spacing	مباعدة
spark	شرارة
stability	استقرارية
stabilizer	مثبت ، مقر
standerd	قياسـي
star – conneation	توصيل نجمـي
star point	نقطة التفرع النجمي
starter	البادىء
static balancer	موازن استاتيكـي
stator	الساكن
steady – state	الحالة المستقرة (حالة – الاستقرار)
steel	فولاذ
stranded	مضفور ، مجدول
stray losses	المفاقيد الشاردة
striking voltage	فولتية الاشعال (القدح)
string	رابط . خيط
substation	محطة ثانوية
supervisory control	اشراف سيطري
surge	تموّر
surge – absorber	ماص التمورات
surge – divertor	مفرع التمورات
susceptance	تقبلية
suspension insulator	عازل تعليق
sustained	مداوم
switch	اقليد (مفتاح)
switching	اقلدة
switch – fuse	اقليد بمصهر
switch- gear	معدات الاقلدة (المؤقلدات)

symmetrical breaking capacity	سعة القطع المتماثلة
symmetrical components	مركبات متماثلة
synchronization	مزامنة (تزامن)
synchronons impeadance	ممانعة تزامنية
tap changer	مغير مأخذ
tertiary winding	ملفات ثالثية
tensile	قابليةالشد – توتر
thermocouple	مزدوج حراري
thermostat	ثرموستات
three – phase	ثلاثـي الطور
time grading	تدرج زمنـي
time switch	مفتاح توقيت (اقليد توقيت)
tie – bar	قضيب رابط
total break time	زمن القطع الـكلـي
totally enclosed	محكم الغلق
tower	برج
transducer	محول الطاقة
transductor	ملف مفاعلة؛محول (مضخم المغناطيس)
transformation ratio	نسبة التحويل
transformer	محوّل
transformer tank	وعاء المحلول (خزان ، دلو)
transient	عابر
transient stability	استقرارية عابرة
transmission	نقل
transposition	ابدال ، تبديل موضع

travelling wave	موجة منتقلة (متحركة)
trip	افلات ، عتق ، اسقاط
tripping device	وسيلة عتق (افلات)
trunk feeder	خط تغذية رئيســي
tuned circuit	دائرة موالفة
turbine	توربين
turn ratio	نسبة اللفات
twin cable	قابلو مزدوج
unbalance	لامتوازن (عدم توازن)
under – excitation	اثارة منخفضة
under–current	تيار منخفض
under ground	تحت الارض
under – voltage	فولتية منخفضة
unearthed	غير مؤرض
unidirectional	وحيد الاتجاه
uniform	منتظم (متجانس)
unit	وحدة ، وحدية
unit protection system	منظومة حماية وحدية
universal	جامع ، عام ، كوني
unsymmetrical	لامتماثل
utilization	انتفاع – استفادة
vacauum	فراغ
valve	صمام
var	فولت أمبير متفاعلة (فار)
vector	متجه
ventilation	تهوية
vibration	اهتزاز
voltage	فولتية
voltage divider	مقسم الفولتية

voltage doubler	مضاعف الفولتية
voltage gradiant	تدرج الفولتية
voltage regulation	انتظام الفولتية
voltage transformer	محول فولتية
volt – ampere	فولت – امبير
watt	واط
wave	موجة
wave – form	شكل (صيغة) – الموجة
wave – front	جبهة الموجة ، مقدمة الموجة
winding	ملف
yoke	مقرن
zero error	خطأ صفري
zero sequence component	مركبة التتابع الصفري
zigzag	متعرج

المصطلحات العلمية

(عربــي – انكليزي)

ابتدائي	Primary
اتساع	Amplitude
اتجاهي	Directional
اثارة	Excitation
اجهاد العازل	Dielectric stress
احديداب	Buckling
احادي الطور	Single-phase
اجراء	Process
ادنى	Minimum
اداء	Performance
ازاحة	Displacement
ازالة	Clear
ازالة التضمين	Demodulation
الساكن	Stator
استبقائية	Remanence
استقرارية	Stability
اسلاك مرشدة	Pilot wires
اسمي	Nominal
افلات ، اسقاط	Trip
اقصى	Maximm
اقطاب بينية	Interpoles
اقليد (مفتاح)	switch
اقلدة	switching
امبير – لفة	Ampere-turn

Absorbtion	امتصاص
Utilisation	انتفاع
Regulation	انتظام
Decomposition	انحلال
Bias	انحياز
Pole slipping	انزلاق القطب
Permeability	انفاذية
Breakdown	انهيار
Vibration	اهتزاز
Starter	باديء
Tower	برج
Construction	بنية (تركيب)
Span	بون (باع)
Porcelain	بورسلين (خزف)
Data	بيانات (معلومات)
Skin effect	تأثير قشري
Inverse time lag	تأخير زمن عكسي
Earthing	تأريض
Mutual	تبادلي
Negative sequence	تتابع سالب
Positive sequence	تتابع موجب
Zero sequence	تتابع صفري
Modification	تحوير
Residual magnetism	مغناطيسية متبقية
grading	تدرج
Sag	تدلي
Oscillation	تذبذب
Overlapping	تراكب (تشابك)

Frequency	تردد
Notation	ترميز (رمز ـ اصطلاح)
Leakage	تسرب
Impregnation	تشرب
Hunting	تشطط
Attenuation	تضاؤل . توهين
Modulation	تضمين
cascade	تعاقبـــي
quadrature	تعامدي
Feedback	تغذية خلفية
Grid in – feed	تغذية الشبكة الداخلة
Tap changing	تغيير المأخذ
Discharge	تفريغ
Coupling	تقارن
Blocking	تقييد
Automatic	تلقائي (ذاتي)
Contact	تماس
Ripple	تموج
Surge	تمور
Interlock	تواشج
Turbine	توربين
Connection	توصيل
Matching	توفيق (موافقة)
Current	تيار
Charging current	تيار الشحن
Breaking current	تيار القطع (الفصل)
Inrush current	تيار اندفاعي
Making current	تيار الوصل
Circulating current	تيار دوار

Eddy current	تيار دوامي
Spill current	تيار مراق
Overcurrent	تيار مفرط (زائد)
Rated current	تيار مقنن
Under current	تيار منخفض
Mesh currents	تيارات الشبيكة
Time constant	ثابت الزمن
Tertiary	ثالثي
Secondary	ثانوي
Thyristor	ثايرستور
Three - phase	ثلاثي الطور
Diode	ثنائي
Bistable	ثنائي استقرار
Front	جبهة (مقدمة)
Attraction	جذب
Bushing	جلبة عازلة
Apparatus	جهاز
Convertor	جهاز تحويل (مغيّر)
Summation	جمع
Transient state	حالة عابرة
Steady state	حالة مستقرة
limit. Margin	حد
Critical	حرج
Bundle, Band	حزمة
Ferrule . ring	حلقة
Protective	حمائي
Protection	حماية
Carrier protection	حماية بالموجات الحاملة
Differential protection	حماية فرقية
Impeadance protection	حماية ممانعية

Unit protection	حماية وحدية
Non - unit protection	حماية لاوحدية
Distance protection	حماية مسافية
Load	حمل
Base load	حمل اساس
Deal load	حمل خامل (غير مكهرب)
Dynamic load	حمل ديناميكي
Fluctuating load	حمل متقلب
Allowable load	حمل مسموح به
Over load	حمل مفرط
Clearance	حيز الخلوص
Outgoing	خارج
Bank	خازن
Characteristic	خاصية
Output	خرج
Line	خط
Trunk feeder	خط تغذية رئيسي
Radial line	خط شعاعي
Loss free line	خط عديم الفقد
Overhead line	خط نقل علوي
error	خطأ
Through	خلالي (نافذ)
Imaginary	خيالي
Loop	دارة
Circuit	دائرة
Alarm circuit	دائرة تنبيه
Double circuit	دائرة ثنائية
Control circuit	دائرة سيطرة
Smoothing circuit	دائرة تنعيم
Tuning circuit	دلرة موالفة

Rotor	دوار
Cycle	دورة
Periodic	دوري
Automatic	ذاتي
Peak	ذروة
Binomial	ذو حدين
Double – winding	ذو ملفين
String, connecter	رابط
Oscillograph	راسم الذبذبات
link	ربط
Armature reaction	رد فعل المنتج
Block diagram	رسم تخطيطي (كتلي)
Lamination	رقيقة
Angular	زاوي
phase - angle	زاوية الطور
Time	زمن
Total Breaking time	زمن القطع الكلي
Fault clearance time	زمن ازالة العطل
Load flow	سريان الحمل
Network	شبكة
Grid	شبكة كبرى
Mesh	شبيكة
Semiconductor	شبه موصل
Strength	شدة (متانة)
Flash over	شرر عرضي
Radial	شعاعي
Waveform	شكل (صيغة) الموجة
Pure	صافٍ (نقي)
Valve	صمام

Cable box	صندوق قابلو
Form	صيغة (هيئة) ، نمط
Conditions	ظروف
Phase	طور
Plastic clay	طين لدن
Transient	عابر
Insulator	عازل
Factor	عامل
Power factor	عامل القدرة
Core - les	عديم القلب
Trip	عتق (افلات)
Node	عقدة
Asynchronous	غير متزامن
Asymmetrical	غير متماثل
Unbalanced	غير متوازن
Unearthed	غير مؤرض
Isolator	فاصل
Branch, Limb	فرع
Vacuum	فراغ
Steel	فولاذ
Voltage	فولتية
Flux	فيض
Cable	قابلو
Circuit breaker	قاطع دورة
Base	قاعدة (اساس)
Power	قدرة
Reactire power	قدرة متفاعلة
Interruption	قصم
Pole	قطب
Shaded pole	قطب مظلل
Break, cut off.	قطع

Cathode	كاثود (مهبط)
Restrain	كبح
Efficiency	كفاءة
Operating quantity	كمية التشغيل
Non-directional	لا اتجاهي
Non - linear	لاخطي
Aperiodic	لادوري
Asynchronous	لامتزامن
Unbalanced	لامتوازن
Unsymmetrical	لامتماثل
Tap	مأخذ
Centre tap	مأخذ وسطي
Surge - absorber	ماص التمورات
Commutator	مبدل (معدل)
Orthogonal	متعامد
Balanced	متزن (متوازن)
Zigzag	متعرج
Parallel, shunt	متوازٍ
Stranded	مجدول (مضفور)
Inductance	محاثة
Inductor	محث
Substation	محطة ثانوية
Totally enclosed	محكم الغلق
Axis	محور
qudrature axis	محور تعامدي
Direct axis	محور مباشر
Transformer	محول
Current - trans former	محول تيار
Auto - trans former	محول ذاتي
Transducer	محول طاقة
Voltage trans former	محول فولتية

Relay	مرحل
Reference	مرجع
Band pass filter	مرشح امرار نطاقي
Complex	مركب
Component	مركبة
Symmetrical – component	مركبة متماثلة
Admittance	مسامحة (مسايرة)
Synchronization	مزامنة
Phasor	مطاور
Anode	مصعد (انود)
Solid	مصمت
Fuse	مصهر
Amplifier	مضخم
Reluctance	معاوقة
Booster	معزز
Parameter	معلم
Feeder	مغذ
Tap changer	مغير مأخذ
Galvanised	مغلفن
Reactance	مفاعلة
Capacitive reactance	مفاعلة سعية
Losses	مفاقيد
Surge divertor	مفرع التمورات
Over	مفرط ، فوق
Phase comparator	مقارن طور
switches	مقاليد
Stabilizer	مقر
Yoke	مقرن
Rated	مقنن
Alive	مكهرب
Contacts	ملامسات

ملدَّن	Annealed
ملف	Winding
ملف قضيبي	Bar winding
ملف ضبط (استقرار)	Holding coil
ملف مفاعل	Reactor
ملف مفاعلة محول . محث محول	Transductor
ملفات تخميد	Damper windings
ممانعة	Impedance
ممانعة مميزة	Characteristic impeadance
منافذة	Permeance
منتج (عضو انتاج)	Armature
منحنى سلسلي	Catenary
منطبق الطور	in - phase
منظم الفولتية الذاتي	Automatic voltage regulator
منفصل	Discrete
منظومة	System
منوب	Alternator
موازن	Balancer
مواصلة	Conductance
موتر	Chorded
موجة	Wave
موجة حاملة	Carrier wave
موجة منتقلة	Travelling wave
مؤرض	Earthed
مؤقلدات (معدات قطع ووصل) . معدات أقلدة	Switchgears
نافذ (خلالي)	Through
نبضة	Pulse
نسبة القصر في الدائرة	Short circuit ratio
نسبة اللفات	Turn ratio

Margin	نطاق . حد . فاصل
Junction	نقطة اتصال (ملتقي)
Star point	نقطة التفرع النجمي
Transmission	نقل
Sending end	نهاية الارسال
Recieving end	نهاية الاستلام
Drooping	هابطة
Corona	هالة
Configuration	هيئة (شكل عام)
Incoming	وارد (قادم . داخل)
Watt	واط
Unit	وحدة . وحدية
Tripping device	وسيلة عتق (افلات)
Link	وصيل (جمعها وصيلات)
Dash – pot	وعاء توهين

الرموز والمختصرات المهمة

Ampere (A)	أمبير
Steel-cored Aluminium (SCA)	المنيـوم لـب فـولاذي (أ . ل . ف)
Ohm (Ω)	أوم (Ω)
Inverse definite minimum time lag (I.D.M.T.L)	تأخير الزمن العكسي الأدنى المحدد
Root mean square (r.m.s.)	جـذر متـوسط التربيـع (ج . م . ت)
Centegrade (C°)	درجة مئوية (مْ)
Centımetre (cm)	سنتمتر (سم)
Farad (F)	فاراد (F)
Potential difference (p.d)	فرق الجهد (ف ج)
Electromotive force (e.m.f)	قوة دافعة كهربائية (ق . د . ك)
Magnetomotive force(m.m.f	قـوة دافعـة مغناطيسيـة (ق . د . مغ)
Kilovolt (kv)	كيلو فولت (ك . ف)
Kilovolt ampere (KVA)	كيلو فولت أمبير (ك . ف . أ)
Microfarad (μF)	مايكروفاراد
Geometric mean distance (GMD)	متوسـط البعـد الهنـدسي (م . ب . ه)
Meter (m)	متـر
Geometricmeanradius (GMR)	متوسط نصف القطر الهندسي (م . نق . ه)
Current transformer (C.T)	محول تيار (C.T)
Summation transformer (S.T)	محول جمع
Voltage transforemer (V.T)	محول فولتية (V.T)

Equivalent copper Area (E.C.A)	مساحـة النحاس المكافئة (م . ن . مك)
Time multiplier	مضاعف الزمن
Mho (℧)	مهو
Megavar (MVAr)	ميكا فولت أمبير
Mega watt (MW)	ميكا واط
Megavolt ampere	ميكا فولت أمبير (م . ف . أ)
Millimetre (mm)	ميليمتر (ملم)
Millihenry (mH)	ميلي هنري
Per – unit system	نظام نسبة الوحدة
Henry (H)	هنري
Watt (w)	واط

انتهى الكتاب بعون الله تعالى

رقم الايداع في المكتبة الوطنية ببغداد ١٤٣ لسنة ١٩٨٧